

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Analýza výkonové charakteristiky větrné turbíny pro
malou větrnou elektrárnu**

**Analysis of Output Power Curve of Wind Turbine for
Small Wind Power Plant**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Vanda**

Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**

Studijní obor: **3907T001 Elektroenergetika**

Téma: **Analýza výkonové charakteristiky větrné turbíny pro malou větrnou elektrárnu**
Analysis of Output Power Curve of Wind Turbine for Small Wind Power Plant

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Vytvořte numerický model větrné turbíny
3. Proveďte CFD analýzu větrné turbíny pro definovanou rychlost větru
4. Pro definovanou zátěž stanovte výkonovou charakteristiku větrné elektrárny
5. Provedené simulace vyhodnoťte
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- RYCHETNÍK, Václav, PAVELKA, Jiří, JANOUŠEK Josef. Větrné motory a elektrárny, Praha, 1997, ČVUT Praha
- BLEJCHAŘ, Tomáš, Návod do cvičení "Modelování proudění" - CFX, Ostrava, 2008, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: **30.11.2011**

Datum odevzdání: **04.05.2012**


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení:

„Prohlašuji, že předloženou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně a je mým původním autorským dílem. Veškeré zdroje a literární prameny, ze kterých jsem čerpal, jsou v práci řádně uvedeny.“

V Ostravě dne 4. května 2012


.....

Martin Vanda

Poděkování:

Mé poděkování má můj školitel a vedoucí diplomové práce Pan Ing. Petr Kačor Ph.D. za konzultace a ochotu pomoci při řešení problematiky této práce.

Abstrakt

V diplomové práci jsou zkoumány účinky proudění vzduchu na větrnou turbínu a efektivní přeměna proudění na elektrickou energii. Teoretická část pojednává o základních principech aerodynamiky, základních typech používaných větrných motorů a problematice přeměny větrné energie pomocí větrných elektráren. Praktická část obsahuje návrh softwarových řešení otázek diskutovaných v teoretické části. Konkrétně se jedná o vlastní návrh 3D modelu větrné turbíny v programu SolidWorks, simulace proudění vzduchu v navržené turbíně a analýzou účinku proudění v prostoru rotoru pomocí programu ANSYS Workbench. Závěrečná část práce je věnována vyhodnocení výsledků simulací a posouzení přeměny získané mechanické energie na elektrickou energii pomocí elektrického generátoru.

Klíčová slova

VĚTRNÁ TURBÍNA, ROTOR, SYNCHRONNÍ GENERÁTOR, RYCHLOST VĚTRU, MOMENT SÍLY, OTÁČKY, VÝKON, RYCHLOBĚŽNOST, VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA

Abstract

In this thesis are examined effects of air flow on wind power turbine and effective conversion of air flow into electricity. Theoretical part discusses basic principles of aerodynamics, general types of wind engines and problematic of the wind energy conversion by wind turbines. Practical part contains software solutions of issues discussed in theoretical part. In particular, original 3D model design of wind turbine by SolidWorks and simulation of air flow in designed turbine and analysis of flow effects in rotor area by ANSYS Workbench. Conclusion of thesis is focused on simulations result evaluation and on assessment of gained mechanical energy conversion into electrical energy via electrical generator.

Key words

WIND TURBINE, ROTOR, SYNCHRONOUS GENERATOR, WIND SPEED, TORQUE, REVOLUTIONS PER MINUTE, POWER, TIP SPEED RATIO, POWER CURVE

Seznam použitých symbolů a značek

| <u>Symbol</u> | <u>Význam</u> | <u>Jednotka</u> |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| A, S | plocha | (m ²) |
| B | magnetická indukce | (T) |
| c ₁ , c ₂ | součinitele aerodynamického odporu | (-) |
| C _p | výkonový koeficient | (-) |
| F _a | axiální síla | (N) |
| F _m | magnetomotorické napětí | (A) |
| I | proud | (A) |
| l | vzdálenost | (m) |
| m | hmotnost | (kg) |
| M | moment síly | (N.m) |
| N | počet závitů | (-) |
| n | otáčky | (min ⁻¹) |
| P | výkon | (W) |
| R _m | odpor magnetického obvodu | (H ⁻¹) |
| t | čas | (s) |
| U | napětí | (V) |
| u | obvodová rychlost | (m.s ⁻¹) |
| v | rychlost | (m.s ⁻¹) |
| V | objem | (m ³) |
| Z | impedance | (Ω) |
| ΔE _k | změna kinetické energie | (J) |
| η | účinnost | (-) |
| λ | rychl oběžnost | (-) |
| ρ | hustota | (kg.m ⁻³) |
| Φ | magnetický tok | (Wb) |
| ω | úhlová rychlost | (rad.s ⁻¹) |

Obsah:

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 1 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 2 |
| 1.1 Energie a výkon větru | 2 |
| 1.2 Teoretické základy aerodynamiky větrných turbín | 3 |
| 1.3 Větrné motory | 8 |
| 1.3.1 Rozdělení větrných motorů podle aerodynamického principu..... | 8 |
| 1.3.2 Rozdělení větrných motorů podle uložení osy rotoru | 12 |
| 1.4 Větrné elektrárny..... | 15 |
| 1.4.1 Princip větrné elektrárny..... | 16 |
| 1.4.2 Elektrická zařízení větrných elektráren | 16 |
| 1.4.3 Synchronní generátor..... | 17 |
| 1.4.4 Dělení větrných elektráren podle výkonu | 19 |
| 1.4.5 Výkonová charakteristika větrné turbíny malé větrné elektrárny | 21 |
| 2 PRAKTICKÁ ČÁST | 23 |
| 2.1 Rozvržení větrné turbíny | 23 |
| 2.2 Vytváření 3D modelu v softwaru SolidWorks | 24 |
| 2.3 Seznámení s ANSYS Workbench | 29 |
| 2.4 Postup práce v ANSYS Workbench..... | 30 |
| 2.4.1 Vytváření geometrie prostoru simulace..... | 30 |
| 2.4.2 Vytváření výpočetní sítě | 34 |
| 2.4.3 Definování úlohy z hlediska fyzikálních parametrů | 37 |
| 2.4.4 CFX Solver – řešení úlohy | 39 |
| 2.4.5 CFX Post – grafické vyhodnocení..... | 40 |
| 2.4.6 Volba parametrů simulace | 41 |
| 2.5 Synchronní generátor s permanentními magnety..... | 44 |
| 3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ | 47 |
| 4 ZÁVĚR..... | 52 |
| Seznam použité literatury a publikací | 54 |
| Seznam příloh | 55 |

Úvod

Energie větru se na Zemi využívá už velmi dlouhou dobu. Nejprve byla využívána k pohonu plachetnic, později k pohonu větrných mlýnů a dnes k pohonu větrných turbín pro výrobu elektrické energie. Z důvodů prudkého vzestupu cen paliv, zvýšené péče o životní prostředí a omezeností zdrojů fosilních paliv se čím dál víc dostávají do středů zájmů obnovitelné zdroje energie jako například sluneční záření, vodní energie, geotermální energie a také větrná energie. Problematika využívání obnovitelných zdrojů energie je v dnešní době velmi aktuální, v mnoha zemích se rozvíjí výroba větrných motorů s hlavním zaměřením na výrobu elektrické energie.

Přináší to sebou bohužel nemalá úskalí, větrná energie je nestabilní a má negativní vliv na kvalitu napětí v distribuční síti. Neméně významný je problém přechodných dějů a přepětí souvisejících se spínacími operacemi systémů větrných elektráren. Problémem je také rychlost větru, která stoupá s výškou, ale u země je minimální. Povrch země včetně budov a stromů narušuje a snižuje rychlost proudícího větru. Je tedy nutné instalovat větrnou turbínu co nejvýše a ve správných lokalitách.

Základním kamenem celé problematiky a získávání energie z větru je maximální funkčnost a účinnost samotné turbíny. Podle zákonů aerodynamiky je teoreticky nejvyšší možná účinnost větrného zařízení necelých 60%. Tuto účinnost teoreticky odvodil již v roce 1919 německý fyzik Albert Betz. Ve skutečnosti je účinnost jistě nižší, musíme ještě počítat s dalšími ztrátami, jako například nedokonalost aerodynamického profilu, ztráty třením v ložiscích, v převodovce a i ztráty při přeměně mechanické energie na elektrickou energii v generátoru. Dříve byly analýzy účinnosti větrných turbín značně náročné, počínaje složitým matematickým výpočtem a samotnou praktickou realizací (často finančně náročnou) konče. To se změnilo s nástupem moderní výpočetní techniky a sofistikovaných programů, které dokáží jednak takovéto složité výpočetní operace relativně rychle analyzovat a zároveň i vytvořit kompletní 3D model turbíny, aniž by se musel nejprve fyzicky vyrobit. V této práci se budu zabývat simulováním proudění větru do prostoru rotoru větrné turbíny pro malou větrnou elektrárnu a jejich analýzou s cílem co nejefektivnějšího využití energie tohoto proudění větru.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Energie a výkon větru

Vítr je vlastně sekundárním projevem sluneční energie. Vítr je výsledkem pohybu teplého a studeného vzduchu v důsledku různého stupně zahřátí vrstev země sluncem. Například během dne je přímořský vzduch nad zemí ohříván rychleji než voda v moři a proto vzduch proudí z moře na pevninu a vytváří tak mořský vánek. V noci se však vzduch nad pevninou ochlazuje rychleji než voda v moři, proudění vzduchu se obrátí a vzniká pevninský vánek.

Energie pohybující se hmoty se vyjadřuje elementárním vztahem:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Kde v je rychlost vzduchu a m jeho hmota (hmotnost). Tu můžeme vyjádřit pomocí objemu V a hustoty vzduchu ρ

$$m = \rho V = \rho As \quad (2)$$

kde A je plocha, kterou daný objem protéká a s je dráha, kterou pohybující se vzduch urazí.

Výkon protékající jednotkovou plochou vyjádříme jako:

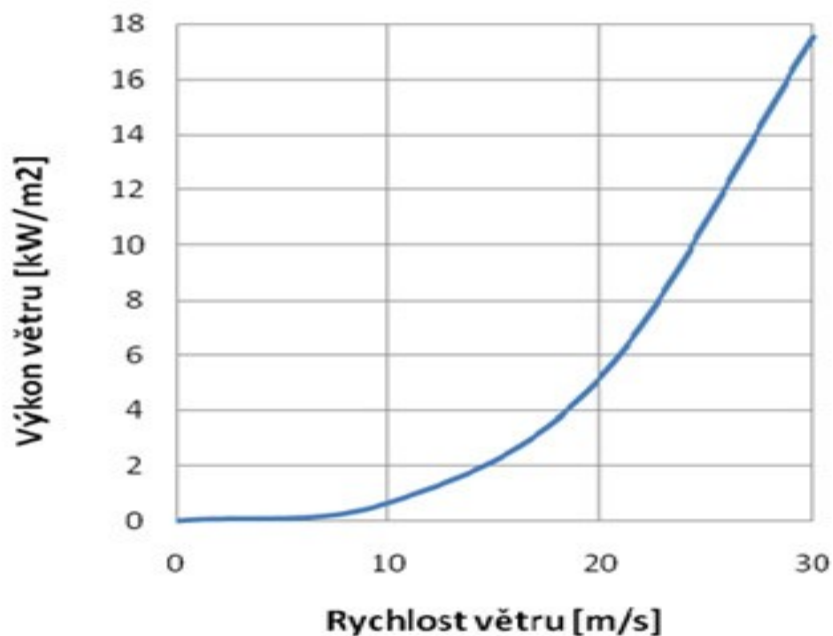
$$P_v = \frac{E}{At} = \frac{1}{2}\rho \frac{As}{At} v^2 \quad (3)$$

kde dosadíme za $s/t = v$ a dostaneme výraz

$$P_v = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (4)$$

Při obecném tlaku 101 325 Pa a teplotě 20°C se obvykle za hustotu vzduchu dosazuje přibližná hodnota 1,2 kg.m⁻³.

Z tohoto výrazu vyplývá, že výkon protékající jednotkovou plochou 1 m² je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Dvojnásobná rychlost větru potom znamená osminásobný výkon. Dosadíme-li rychlost v m.s⁻¹, hustotu vzduchu v kg.m⁻³, obdržíme výkon v jednotce W.m⁻², tedy kolik wattů protéká plochou 1 m². Bez ohledu na určitou míru nepřesnosti je stanovení výkonu a energie větru protékajícího za určitou dobu jednotkovou plochou velmi důležité. [1]

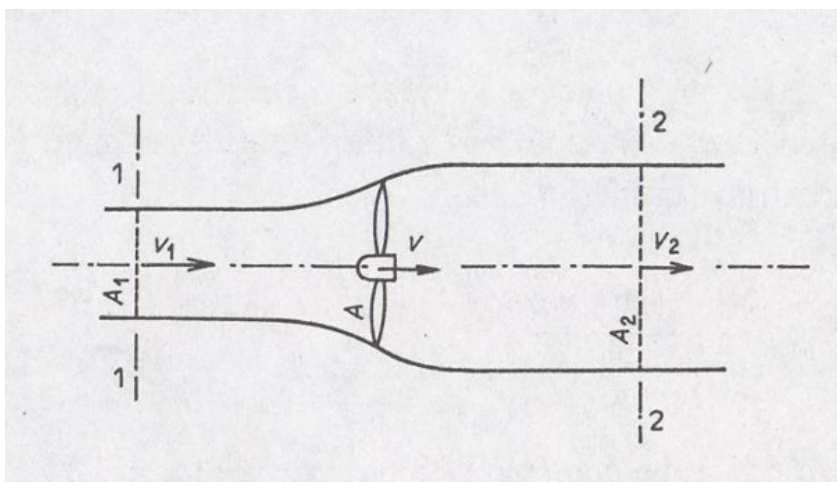


Obr. 1: Závislost výkonu větru protékajícího plochou 1m^2 na jeho rychlosti. [4]

1.2 Teoretické základy aerodynamiky větrných turbín

Větrné motory se požívají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci turbíny. Základní princip jejich funkce spočívá v tom, že jejich určitá část nazývaná lopatky zpomaluje proud vzduchu, který protéká pracovním prostorem turbíny, a tím odnímají část větrné energie. Je logické, že nelze odebrat z jednotkové plochy více energie, než vítr obsahuje.

Na obrázku 2 je znázorněn proud vzduchu protékající idealizovaným větrným motorem. Neuvažuje se v něm míšení proudu, ve vodorovném směru je proud omezen dvěma kontrolními plochami 1 a 2, v nichž má rychlost v_1 a v_2 a protéká průřezy A_1 a A_2 . V rovině vrtule s průtočnou plochou A je rychlost proudu v .



Obr. 2: Schématické znázornění proudu vzduchu protékajícího vrtulí

V prostoru omezeném proudovými plochami se nepřenáší hmota ani energie a platí tedy rovnice kontinuity

$$v_1 A_1 = v A = v_2 A_2 \quad (5)$$

a ze zákona o zachování hybnosti lze odvodit axiální sílu působící na rotor

$$F_a = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (6)$$

a výkon

$$P = F_a v = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \quad (7)$$

Výkon vypočítaný ze změny kinetické energie proudu proteklého vzduchu za sekundu kontrolní plochou

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (8)$$

Ze srovnání rovnic (7) a (8) vyplývá

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (9)$$

Axiální síla působící na rotor

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

a výkon rotoru

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (11)$$

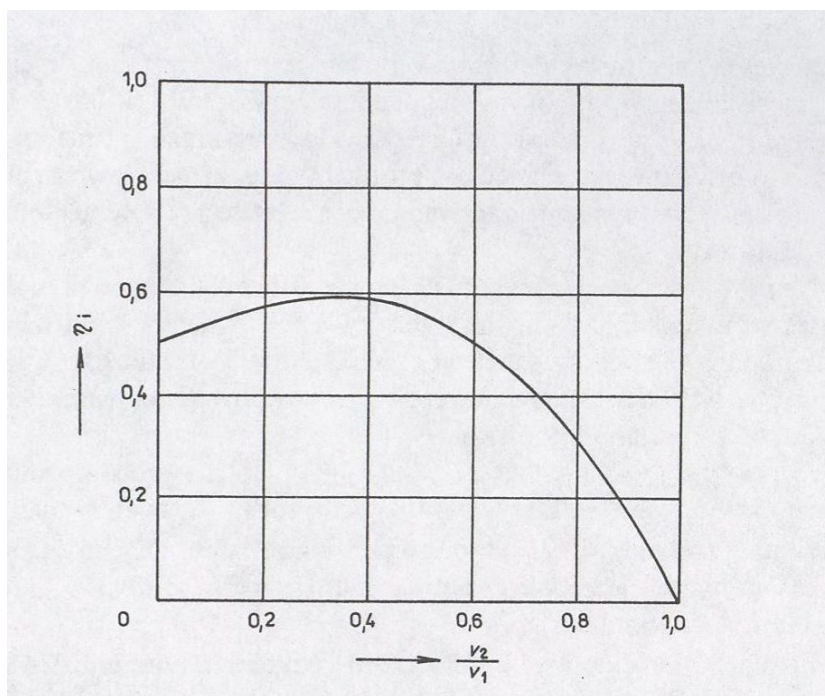
Vyjádří-li se tento výkon v poměru k výkonu větru, vznikne bezrozměrná veličina, ideální účinnost η_i , které lze dosáhnout v ideálním rotoru s nekonečným počtem tenkých lopatek pracujících bez aerodynamického odporu.

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{2v_1^3} \quad (12)$$

Závislost účinnosti pro různé poměrné rychlosti v_2/v_1 je na obrázku 3. Derivování této funkce podle proměnné v_2 lze početně stanovit maximálně dosažitelnou ideální účinnost označovanou též jako Betzovu, která při $v_2/v_1 = 1/3$

$$\eta_i = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (13)$$

Pro dosažení této účinnosti by ovšem musel mít idealizovaný rotor s nekonečným počtem nekonečně tenkých lopatek, na nichž by nevznikalo tření nekonečně velkou obvodovou rychlost,



Obr. 3: Závislost ideální účinnosti větrného motoru na poměru rychlosti za rotorem a před ním

aby v obtékajícím proudu vzduchu o rychlosti v_2 nevznikala rotační složka, která by zvyšovala jeho kinetickou energii.

Odvození ideální účinnosti platí jen pro větrné motory pracující na vztlačovém principu, jejichž rotor je sestaven z lopatek s aerodynamickým profilem. Směr, kterým se profil pohybuje, se výrazně liší od směru větru a rychlost jeho pohybu je v rozhodující části lopatky větší, než rychlost větru.

U odporových principů se uvádí maximální ideální účinnost $\eta_{i\max} = 1/3$ při obvodové rychlosti $u = v/3$. Skutečná účinnost však bude značně závislá na zvoleném typu větrného motoru. [1]

V praxi se využívá výkonového součinitele C_P , který vyjadřuje poměr výkonu rotoru k výkonu větru, který celou plochou protéká. Jeho hodnota musí být samozřejmě menší, než je hodnota ideální účinnosti η_i jak byla stanovena výše.

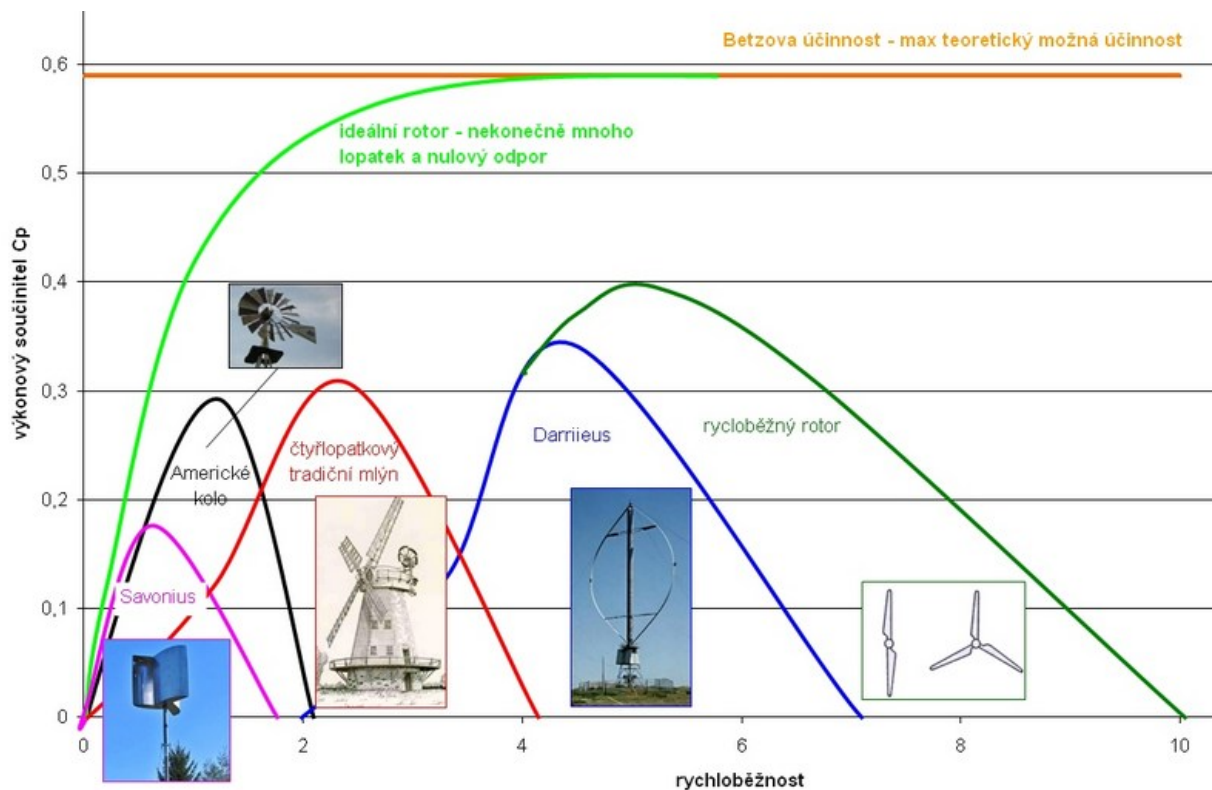
$$C_P = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (14)$$

S výkonovým koeficientem C_P úzce souvisí také důležitý bezrozměrný koeficient rychloběžnosti λ

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (15)$$

kde u představuje obvodovou rychlost rotoru při otáčení a v je rychlost větru.

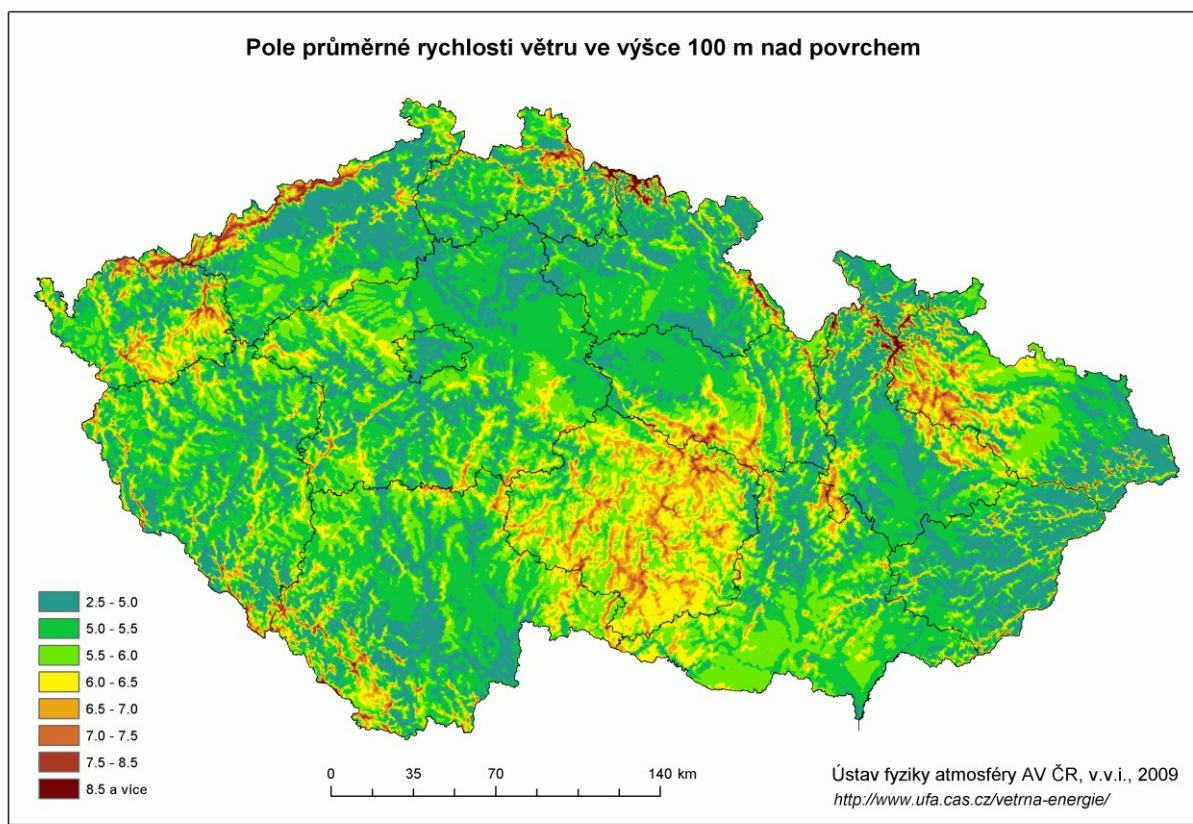
Tento koeficient ovlivňuje počet listů rotoru. Z níže uvedeného grafu vyplývá, že čím menší je koeficient rychloběžnosti λ , tím procentuálně větší plocha kruhu rotoru musí být pokryta rotorovými listy. Přitom je principiálně lhostejné, na kolik listů je daná plocha rozdělena. Pro výrobu elektrické energie jsou výhodnější rychloběžné větrné motory, neboť generátory elektrické energie jsou účinnější při vysokých otáčkách. To se dá samozřejmě vyřešit pomocí převodovky, ale na ní vznikají zbytečné ztráty, z mechanického hlediska je slabým místem větrné elektrárny a také zhoršuje rozběh větrného motoru. Na druhou stranu pomaloběžné motory mají povětšinou už z principu velký statický moment a tím snadnější rozběh, takže tato nevýhoda je částečně korigována.



Obr. 4: Rozdělení větrných turbín podle rychloběžnosti rotoru [5]

Od těchto účinností ovšem musíme odečíst ještě další ztráty, např. ložiscích, převodech, lopatkách rotoru atd. Takže skutečná účinnost bude ještě nižší.

I přes jistou nepřesnost, energie větru v dané lokalitě je stěžejním parametrem pro úspěšnou a funkční realizaci větrné elektrárny v dané lokalitě. Největší zájem o větrnou energetiku je přirozeně v zemích s rozvinutým průmyslem a s příznivými větrnými podmínkami. V České republice bohužel větrné podmínky nejsou příznivé, jedná se většinou o pár horských oblastí a vrchovin (jak můžeme vidět na obr. 5).



Obr. 5: Průměrná rychlost větru ve výšce 100 m na území ČR (2009) [3]

1.3 Větrné motory

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Základní princip jejich funkce spočívá v tom, že zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou, a tím odnímají část jeho energie. Nejprve je můžeme rozdělit podle aerodynamického principu využití větrné energie na vztlakové a odporové. Druhé důležitější rozdělení je podle uložení osy rotoru. Tady rozlišujeme také dva typy, turbíny s horizontální (vodorovnou) osou a s vertikální (svislou) osou otáčení rotoru. [1]

1.3.1 Rozdělení větrných motorů podle aerodynamického principu

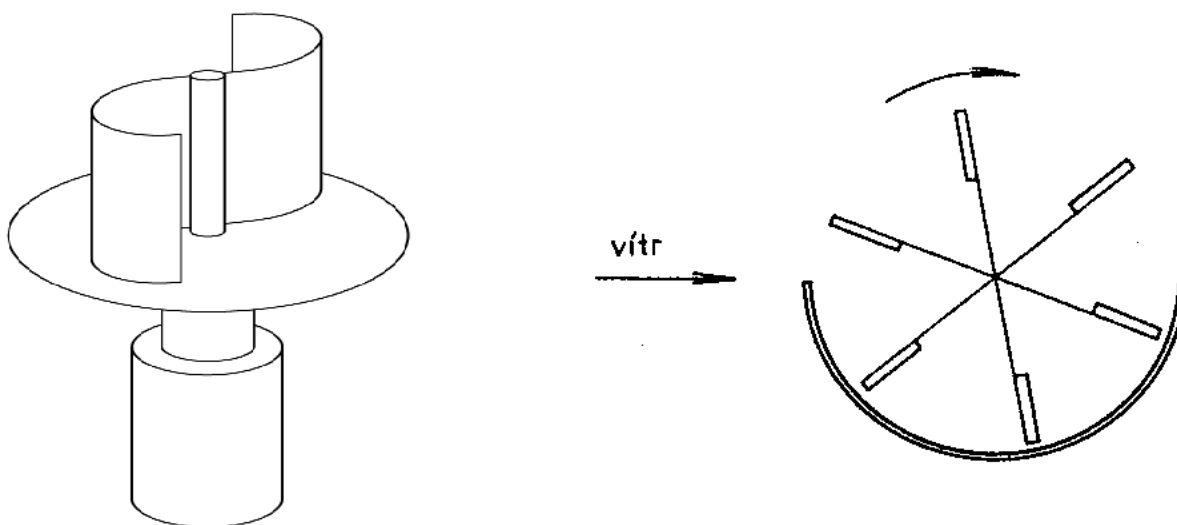
Větrné motory pracující na odporovém principu

Tyto motory patří mezi nejstarší a mohou mít horizontální i vertikální osu otáčení. Svoji konstrukcí se mohou značně lišit, jejich podstatou však je, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor, proud vzduchu na ní zpomaluje a je na ní vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována obvykle na rotační pohyb. Plocha nastavená proudu vzduchu se pohybuje přibližně v jeho směru menší

rychlostí, než je rychlost větru, vzniká však problém, jak ji dostat na výchozí místo. To lze vyřešit několika způsoby:

- Funkční plocha má takový tvar, aby byl její odpor různý při různých směrech pohybu. To je například miskový anemometr, u něhož polokoule orientovaná svojí dutinou proti větru mu klade odpor přibližně 3,5krát větší než polokoule nastavená proti větru svojí vypouklou částí. Na takových polokoulích rozmístěných po obvodu rotoru vzniká moment sil, který jím otáčí. Na podobném principu pracuje i rotor typu "Savonius" kde jsou kulové plochy nahrazeny plochami válcovými. Taková řešení však nepřinášejí žádné zvláštní výhody, účinnost v porovnání s jinými typy motorů je menší.
- Část rotoru, která se pohybuje v protisměru větru, je krytá štítem, který se musí podle směru větru natáčet. Tento princip lze použít i v uspořádání s vodorovnou osou, kde je skryta spodní polovina rotoru. V tomto případě se však celý větrný motor musí natáčet podle směru větru. V dnešní době už to také není ničím výhodná koncepce.
- Mění se velikost plochy rotoru vystavená větru podle toho, zda se pohybuje v jeho směru nebo ve směru opačném. Tento princip vyžaduje zvláštní mechanismus, který umožňuje samočinné natáčení lopatek rotoru nebo sám jejich natáčení ovládá. Málo rozšířená a používaná varianta.
- Na odporovém principu by mělo pracovat i zařízení, kdy by byl ve vyšších vrstvách atmosféry při vysoké rychlosti větru unášen připoutaný balon, a odvíjející lano na zemi by vykonávalo práci. Zpětný pohyb balonu by se uskutečňoval blíže zemského povrchu, kde je rychlost větru, a tím i síla na něj působící, menší a také menší spotřeba práce. Takový, i když zmiňovaný případ patří spíše mezi utopické fantazie, ovšem teoreticky funkční je.

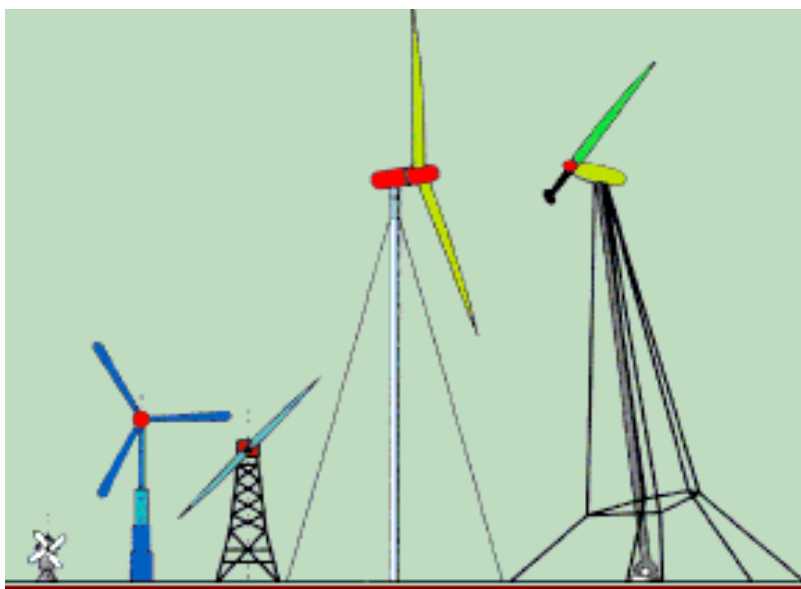
Větrné motory s odporovým principem mají teoretickou účinnost poměrně nízkou.



Obr. 6: Vlevo rotor Savonius, vpravo rotor s krycím štítem [1]

Větrné motory pracující na vztlakovém principu

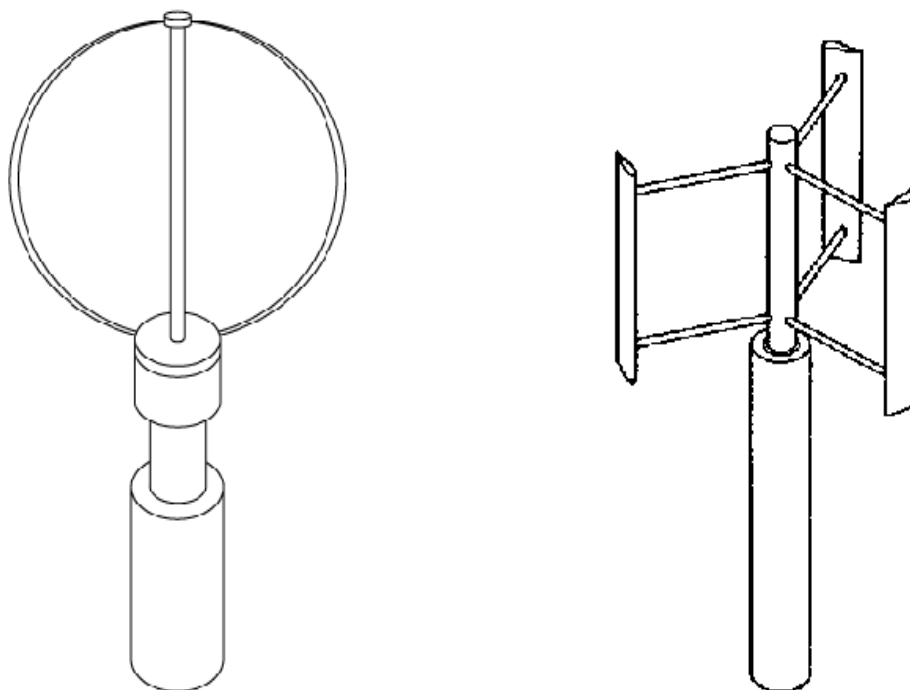
Mezi větrné motory pracující na vztlakovém principu patří vrtule a větrná kola s vodorovnou i svislou osou otáčení. Ty s vodorovnou osou jsou orientovány svojí rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Vrtule se dnes vyskytují nejčastěji ve třilístém provedení. Existují i dvou, čtyř nebo jednolísté s protizávažím. Zejména u třilístého provedení se jedná o typický nejrozšířenější větrný motor pro větší a velké větrné elektrárny dodávající elektrickou energii do distribuční sítě.



Obr. 7: Typy vrtulí pracující na vztlakovém principu [6]

Větrná kola mají místo vrtulových listů jednoduché, obvykle plechové lopatky, jejichž počet se pohybuje od čtyř do několika desítek podle velikosti větrného kola a podle požadované rychloběžnosti. V zásadě platí, že frekvence otáčení při stejném průměru rotoru nepřímo závisí na počtu lopatek, při větším počtu lopatek se větrný motor snadněji rozbíhá a má při rozběhu větší moment síly. Natáčení osy rotoru do směru větru se děje samovolně, je-li rovina vrtule za osou natáčení rotorové gondoly po směru větru – tedy na závětrné straně. U rotoru umístěného před stožárem, proti směru větru od osy natáčení rotorové gondoly – na návětrné straně, musí být gondola opatřena orientačním zařízením, u menších větrných motorů kormidlem.

Na principu vztlaku pracují také větrné motory s vertikální osou, které patentoval francouzský inženýr Darrieus. Jejich rotor může mít dvou, tří i čtyřlísté provedení a listy s aerodynamickým profilem mohou být tvarovány tak, aby jejich namáhání odstředivými silami na ohyb bylo minimální. Rotor připomíná řecké písmeno Φ , jsou však i provedeny rotory trojúhelníkového tvaru, nebo ve tvaru písmene H. Vztlakové motory mají teoretickou účinnost maximálně 59,3% (dnešní dosahují účinnosti až 45%).[1]



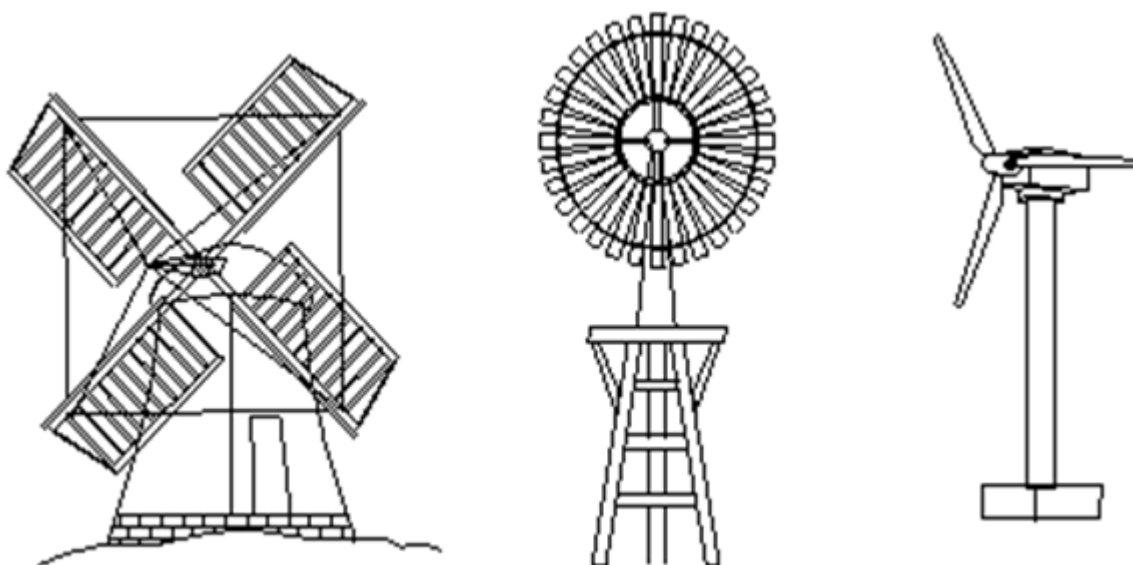
Obr. 8: Rotory Darrieus, vlevo s profilem Φ , vpravo s profilem H [1]

1.3.2 Rozdělení větrných motorů podle uložení osy rotoru

Větrné motory s horizontální osou otáčení

Tento typ elektráren pracující na vztakovém principu je v současné době nejrozšířenější, a můžeme zde zařadit větrné elektrárny s vrtulí a lopatkovými koly. Rotor se nastavuje kolmo ke směru větru a listy rotoru jsou umístěny vysoko nad zemí. Vyrábějí se do výkonů až několika megawatt a některé jejich typy jsou velmi rozšířené. Lze je rozdělit do tří skupin:

- Klasické větrné mlýny
- Pomaloběžné větrné motory
- Rychloběžné větrné motory



Obr. 9: Větrné motory s horizontální osou otáčení

Pro výrobu elektrické energie jsou výhodné prakticky jen rychloběžné větrné motory (viz. Obr. 5), zvláště jde-li o větší výkony, které pomaloběžné motory již nemohou pokrýt vzhledem ke svým omezeným rozměrům. Rotor mají provedený nejčastěji jako tří nebo dvoulistou vrtuli, s pevnými nebo natáčecími listy. Vrtulové listy mají u všech větších větrných motorů velmi kvalitní aerodynamický profil, který se mění po celé délce listu tak, aby byla dosažena vysoká účinnost v co největším rozsahu pracovních výkonů a současně, aby byly respektovány požadavky pevnosti a provozní spolehlivosti. Účinnost těchto motorů je vyšší než u motorů s vertikální osou otáčení. Jejich nevýhodou je špatný

rozběh při malých rychlostech větru, přibližně musí být rychlost větru větší než 5 m.s^{-1} , pokud nejsou vybaveny zařízením pro usnadnění rozběhu.

Větrné motory s vertikální osou otáčení

Větrné motory se svislou osou patří k nejstarším používaným větrným motorům. Jsou jednoduché a nevyžadují složitý přenos výkonu od osy rotoru na zem, jako větrné motory s vodorovnou osou. Výhoda tohoto typu rotoru je v tom, že pracuje při libovolném směru větru, ovšem v praxi se toto technické řešení používá spíše pro motory menších výkonů. Dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost. Další nevýhodou je malá výška rotoru nad terénem a z toho plynoucí menší rychlost větru, tím pádem i nižší účinnost rotoru a jsou pomaloběžné. Provedeny můžou být na odporovém i vztakovém principu.

Větrné motory pracující na **vztakovém** principu se navrhují a vyrábějí v různých variantách, jejich způsob práce je však stejný. Základní princip jejich funkce patentoval francouz Darrieus v roce 1931. Základní součástí těchto větrných motorů jsou profilované lopatky různého tvaru, které rotují kolem svislé osy. Větrné motory se svislou osou s pevnými lopatkami se vyrábějí a instalují, i když ne v takové míře jako větrné motory s vodorovnou osou. Jejich nevýhody prozatím převažují nad výhodami. [1]



Obr. 10: Moderní mnoholopátkový vztakový Darrieusův rotor

Výhody:

- Nezávislost na směru větru
- Mechanická síla na zemi
- Jednoduchá konstrukce věže
- Nižší náklady na výrobu lopatek

Nevýhody:

- Nižší otáčky rotoru
- Vyšší hmotnost
- S kotevními lany zabírá větší plochu
- Nižší aerodynamická účinnost
- Značná nerovnoměrnost momentu síly během otáčky

Odporový princip je základem všech starších provedení a byl zpracován v celé řadě různých variant. Jejich typickými vlastnostmi jsou velmi malá rychloběžnost i relativně nízký výkonový součinitel. Další nevýhodou těchto motorů je skutečnost, že kladou velký odpor větru i po svém zastavení a lze je při extrémních rychlostech větru chránit před poškozením částečně pouze tím, že je rotor zastaven a tak na něj nepůsobí odstředivé síly.

U odporových větrných motorů se svislou osou se v proudu větru pohybují dva prvky rotoru (zjednodušeně), jeden ve směru větru se součinitelem aerodynamického odporu c_1 a druhý proti větru se součinitelem odporu c_2 , přičemž je zanedbána jejich proměnlivost se změnou orientace prvku během otáčky rotoru. Pro odvození se předpokládá stejná velikost obou ploch vystavených proudu vzduchu.

Relativní rychlost větru působícího na prvek, který se pohybuje v jeho směru, je $v - u_t$. Proti větru se pohybuje prvek rychlostí $v + u_t$, kde u_t je obvodová rychlost v místě působíště síly větru na uvažovaný prvek. Protože odpor kladený tímto prvkem je úměrný druhé mocnině relativní rychlosti, pak

$$P = \frac{1}{2} \rho A \left[c_1 (v - u_t)^2 u_t - c_2 (v + u_t)^2 u_t \right] \quad (16)$$

Uvažuje-li se výkon větru protékajícího plochou $2A$ jako vztažná hodnota, pak výkonový součinitel je roven

$$C_P = \frac{c_1 \cdot (v - u_t)^2 \cdot u_t - c_2 \cdot (v + u_t)^2 \cdot u_t}{2 \cdot v^3} \quad (17)$$

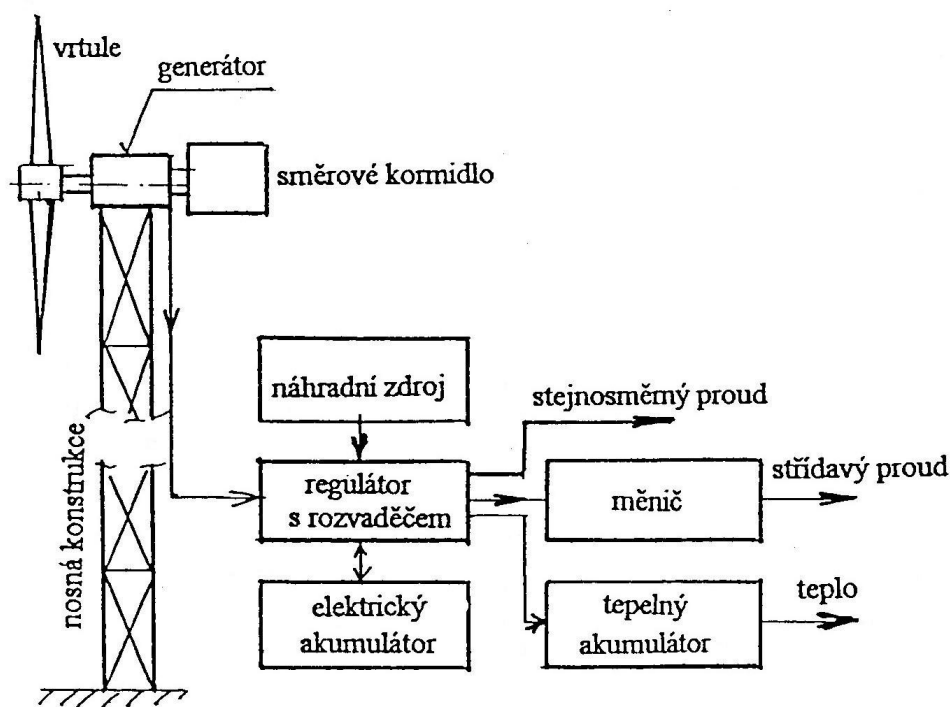
Je zřejmé, že dosažitelný výkonový součinitel bude výrazně nižší, než u větrných motorů pracujících na vztlakovém principu.

Z rozboru předností a nevýhod větrných motorů s vertikální osou je možno odhadnout, že používání těchto motorů se bude omezovat hlavně na oblasti s vysokými přízemními rychlostmi větru, zejména na přímořské oblasti s vysokými průměrnými rychlostmi větru a dále na místa, kde je silné místní urychlení, například horská sedla a průsmyky s výrazně převládajícími vhodně orientovanými směry větru. Při vichřicích, kdy rychlost větru značně překračuje maximální přípustné hodnoty, klade stojící rotor jen velmi malý odpor a není zapotřebí velkých brzdících sil k jeho zajištění proti náhodnému rozběhu. [1]

1.4 Větrné elektrárny

Větrné motory mají rozsáhlé uplatnění, které je možno rozdělit do tří základních skupin, jako mechanické pohony (dříve větrné mlýny), pro čerpání vody (např. zavlažování), a hlavně pro výrobu elektrické energie.

Výrobu elektrické energie vykonávají větrné motory pohánějící elektrické generátory od výkonů desítek wattů až do několika megawattů. Malé větrné elektrárny se používají pro nabíjení baterií, čerpání nebo ohřev vody a k napájení elektrických nástrojů a domácích spotřebičů. Pracují samostatně, jako jediný zdroj napájející spotřebiče nebo v místních samostatných sítích ve spolupráci s dieselovými agregáty a slunečními bateriemi. Větrné elektrárny o výkonu nad 50 kW často dodávají elektrickou energii do rozvodné sítě. Životnost nové větrné elektrárny se udává 20 let od jejího uvedení do provozu. [1]



Obr. 11: Blokové schéma větrné elektrárny [7]

1.4.1 Princip větrné elektrárny

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na stožáru energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie (na podobném principu turbogenerátoru pracuje jak klasická, vodní i jaderná elektrárna). Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly; listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídel letadla. Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vzlakové síly s druhou mocninou rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny. Obsluha větrné elektrárny je automatická. [4]

1.4.2 Elektrická zařízení větrných elektráren

Elektrická energie se ve větrných elektrárnách vytváří většinou asynchronními nebo synchronními generátory trojfázového střídavého proudu. Jejich základní vlastnosti se mění podle toho, zda elektrárna pracuje samostatně a dodává elektrickou energii spotřebičům v samostatné místní síti nebo je připojena na rozvodnou elektrickou síť a spolupracuje s dalšími zdroji.

Synchronní generátor přímo připojený na elektrickou rozvodnou síť má otáčivou rychlost konstantní, danou kmitočtem sítě a počtem pólů. Při kmitočtu sítě 50 Hz jsou otáčky dvoupólového stroje 3000 Hz^{-1} , čtyřpólového 1500 Hz^{-1} , šestipólového 1000 Hz^{-1} .

Asynchronní generátor má otáčivou rychlost skoro konstantní. Při nulovém zatížení se jeho rychlost shoduje s otáčivou rychlostí synchronního generátoru o stejném počtu pólů a s nárůstem výkonu dodávaného do sítě se nepatrně zvyšuje. Při jmenovitém zatížení se zvýší přibližně o 1 až 2 %.

Rotory větrných motorů elektráren jsou nejčastěji navrhovány s vodorovnou osou jako rychloběžné třílisté vrtule umístěné nad stožárem. Natáčení rotoru proti větru se provádí elektrickými nebo hydraulickými motory. Pro dosažení maximálních výkonů a bezpečného chodu jsou provozní stavy větrné elektrárny vyhodnocovány a řízeny počítačem.

Malé větrné elektrárny o výkonech do 10 kW jsou dostatečně rychloběžné, a proto se u nich používají vícepólové synchronní generátory s permanentními magnety. Obsahují usměrňovač pro napájení akumulátorové baterie nebo autonomní stejnosměrné sítě o jmenovitém napětí 12, 24 nebo 120 V. Dále mohou být doplněny polovodičovým střídačem, umožňujícím napájení malých střídavých jednofázových spotřebičů. Dynama, vytvářející stejnosměrný proud přímo, se již nepoužívají pro zvýšené náklady na provoz a údržbu, způsobené komutátorem a kartáči pro odvod proudu z rotoru. [1]

1.4.3 Synchronní generátor

Synchronní generátor (alternátor) je elektrický generátor pro výrobu elektrické energie ve formě střídavého napětí a proudu. Díky svým vlastnostem je to nejčastěji používaný typ elektrického generátoru v současných elektrických sítích. Jeho funkce je založena na využití čtyř základních zákonů elektrotechniky:

- Elektrický proud I , který protéká vodičem, vytváří v jeho okolí magnetické pole o intenzitě H . V elektrických strojích se znásobuje magnetický účinek proudu I tím, že z vodiče vytvoříme cívku o N závitů. Cívka potom vytváří magnetomotorické napětí (mmn). $F_m = N \cdot I$
- Magnetomotorické napětí F_m vytváří v magnetickém obvodu o magnetickém odporu R_m magnetický tok Φ o velikosti $\Phi = \frac{F_m}{R_m}$
- Změna magnetického toku v čase indukuje do cívky s N závitů napětí u , o okamžité velikosti $u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$

- d) Na vodič o délce l , umístěný v magnetickém poli o indukci B a protékaný proudem I , působí síla F o velikosti $F = B \cdot I \cdot l$

Klasický elektrický alternátor má tyto základní části:

- Pracovní vinutí, nazývané také indukt nebo kotva, do kterého se při práci alternátoru indukují napětí a ze kterého se odebírá vyrobená elektrická energie.
- Budící vinutí, které slouží k vytvoření potřebného magnetického toku ve stroji. Toto vinutí je umístěno na opačné části stroje, než je umístěno pracovní vinutí, tedy u většiny strojů na rotoru.
- Magnetický obvod, který vymezuje cestu pro hlavní pracovní magnetický tok stroje Φ . Většina délky magnetického obvodu je vytvořena dobře magneticky vodivým materiálem – železem – a nalezneme ho jak na statoru, tak i na rotoru stroje. Části magnetického obvodu na statoru a rotoru jsou od sebe odděleny “vzduchovou mezerou“, přes kterou rovněž musí protékat pracovní magnetický tok Φ . Přesto, že je vzduchová mezera široká pouze několik milimetrů, představuje rozhodující část magnetického odporu R_m celého magnetického obvodu.
- Konstrukční části stroje, které slouží k uchycení výše uvedených pracovních – aktivních – částí a vytvoření z nich jednoho konstrukčního celku. Patří sem hřídel a jeho ložiska, kostra statoru s patkami pro montáž na základovou desku, svorkovnice pro elektrické připojení alternátoru k rozvaděči a mechanická spojka pro mechanické spojení s poháněcím motorem nebo převodovkou. Mezi konstrukční části řadíme také ventilátor, který je u většiny alternátorů nasazen na hřídeli a který slouží k intenzivnímu ochlazování pracovních částí stroje.
- Příslušenství alternátoru, kam řadíme:
 - Elektrický rozvaděč s předepsanými jištěními alternátoru, se synchronizační soupravou a spínacími přístroji pro připojení ke spotřebičům nebo na rozvodnou síť,
 - Budící soustavu s regulovaným zdrojem budícího proudu, regulátorem napětí a dalšími regulátory a automatikami a případným zdrojem počátečního nabuzení,
 - Mazací soupravu, která zajišťuje přívod mazacího oleje do ložisek stroje a jeho chlazení.

Alternátor je stroj pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou. Při odběru elektrického výkonu ze svorek pracovního vinutí musí být na jeho rotor přiveden odpovídající mechanický příkon. Mechanický příkon je dán součinem krouticího momentu M a úhlové otáčivé rychlosti rotoru Ω_m . v

každém stroji vznikají ztráty, o které je příkon větší než výkon. Poměr mezi výkonem a příkonem je nazýván účinnost η .

Jmenovitá účinnost η_n elektrických alternátorů se pohybuje mezi 0,9 až 0,97 podle velikosti jejich výkonu a otáčivé rychlosti. Čím menší je jmenovitý výkon a rychlost, tím je horší účinnost. Celkové ztráty a tedy i účinnost při provozu závisí také na pracovním bodě alternátoru, ve kterém je alternátor právě provozován. Ztráty vznikají v různých částech alternátoru. Dělíme je do dvou skupin:

- Ztráty naprázdno, které jsou nezávislé na zatížení. Sem patří ztráty v ložiskách, ztráty ventilační a ztráty v magnetickém obvodu (ztráty v železe)
- Ztráty nakrátko, které jsou závislé na zatížení. Sem patří ztráty v pracovních vinutích statoru a v budícím vinutí rotoru. Název je odvozen od toho, že se jejich velikost určuje při měření s pracovním vinutím spojeným dokrátko – do zkratu.

Při znalosti těchto složek ztrát můžeme pro každý pracovní bod určit příslušnou účinnost.

U alternátorů mohou být místo budícího vinutí na rotoru jako zdroje magnetického toku použity permanentní magnety. Použití permanentních magnetů pro buzení alternátorů nalezlo širší uplatnění s rozvojem technologie jejich výroby z feritu nebo vzácných zemin Sm-Co a Nd-Fe-B. Alternátory s permanentními magnety mají konstrukci pracovního vinutí a magnetický obvod statoru shodný s klasickými alternátory. Permanentní magnety jsou umístěny na rotoru a nahrazují budící vinutí jako zdroj magnetomotorického napětí F_b . Do určité velikosti F_b se chovají jako zdroj konstantního magnetického toku. Odpadá tedy budící vinutí s jeho ztrátami, budící soustava a regulátor napětí. Alternátory s permanentními magnety mají proto lepší účinnost a jednodušší obsluhu. Používají se především u menších rychloběžných alternátorů.

Asynchronní generátory se používají spíše pro větrné elektrárny větších výkonů. [1]

1.4.4 Dělení větrných elektráren podle výkonu

Malé větrné elektrárny (mikroelektrárny) - Pro účely malých výkonů slouží malé a mikroelektrárny malých rozměrů, jednoduché konstrukce a výkony do několika desítek kW. Slouží k místní výrobě elektrické energie tzn. elektřiny, která není dodávána z centrální (hlavní) napájecí sítě.

Větrné elektrárny malých výkonů se nejčastěji využívají jako takzvané “ostrovní systémy“, samostatné sítě, určené k nabíjení akumulátorových baterií a k čerpání nebo ohřevu vody. Jejich různorodost a koncepce je velká. Mnohdy se používají sice odzkoušená, ale zastaralá konstrukční řešení. Současný vývojový trend v této oblasti vychází z osvědčených principů a přináší použití nejmodernějších

technologií a materiálů. U elektrických generátorů je to například použití bezkartáčových synchronních generátorů buzených permanentními magnety ze vzácných zemin. Tyto generátory dosahují vyšší účinnosti, mají kompaktnější rotor bez přívodu budícího proudu a zjednodušené řízení. Zjednodušení konstrukce a řízení větrných elektráren rozšiřuje možnosti jejich samostatného použití v rozvojových zemích a odlehlých oblastech. Výkony malých větrných elektráren se pohybují do 10 kW. Tyto lze rozdělit na:

- Mikroelektrárny, s výkonem zhruba do 2,5 kW, což jsou zařízení na výrobu stejnosměrného proudu při napětí 12 V nebo 24 V, které jsou výhradně určeny pro dobíjení baterií. Takto nahromaděná energie může sloužit k osvětlení, k napájení komunikačních systémů, rádiových a televizních přijímačů a dalších elektrických spotřebičů. Často bývají v kombinaci se solárními články.
- Elektrárny se jmenovitým výkonem v rozsahu 2,5 kW až 10 kW. Jedná se o zařízení s napětím 48 V až 220 V a jsou určena pro vytápění domů, pro ohřev vody, případně pro pohon motorů.

Malé větrné elektrárny se provozují s proměnnými otáčkami a tedy s proměnným kmitočtem a napětím. Regulace napětí se provádí změnou budícího proudu. Synchronní generátory s permanentními magnety mají větší účinnost a regulace se provádí přerušováním proudu. Stejnosměrné napětí potřebné pro nabíjení akumulátorů se získá usměrněním neřízeným polovodičovým můstkovým usměrňovačem.

Jejich výhody tedy jsou: zdroj elektrické energie v místech mimo rozvodnou síť, dobrý poměr cena/výkon, mají malé rozměry, malou hmotnost, snadno se instalují.

Střední větrné elektrárny - Za střední větrné elektrárny se považují turbíny se jmenovitým výkonem v rozsahu 60 kW až 750 kW a s průměrem vrtulí od 16 m do 45 m. Může napájet i několik stavení.

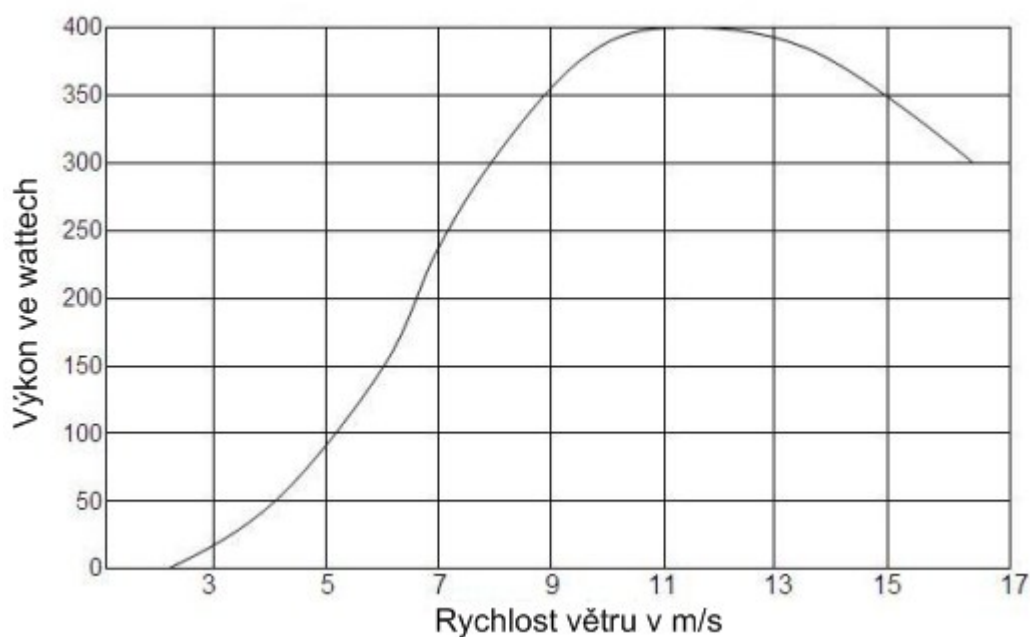
Velké větrné elektrárny - Za velké větrné elektrárny jsou považovány turbíny s nominálním výkonem v rozsahu 750 kW až 6400 kW a s průměrem vrtulí od 45 m do 128 m. Elektrárny s velkým výkonem (asi od 300 kW) jsou přednostně určeny k dodávce energie do veřejné rozvodné sítě.

Elektrárny velkých výkonů mají asynchronní a synchronní generátor, který dodává střídavý proud o napětí 660 V a vyšších, a tudíž nemohou pracovat jako autonomní zdroje energie. Existují i elektrárny se speciálním mnohapolovým generátorem, který nevyžaduje převodovou skříň. Většina elektráren má konstantní otáčky regulované natáčením listů a proměnným převodovým poměrem převodovky. Některé typy mají i dvě rychlosti otáčení. Některé střední elektrárny mohou mít i proměnné otáčky podle okamžité rychlosti větru. V praxi se používají většinou větrné elektrárny s horizontální osou rotace a u velké elektrárny mají průměr rotoru až 80 m a věž o výšce více než 80 metrů. Trendem

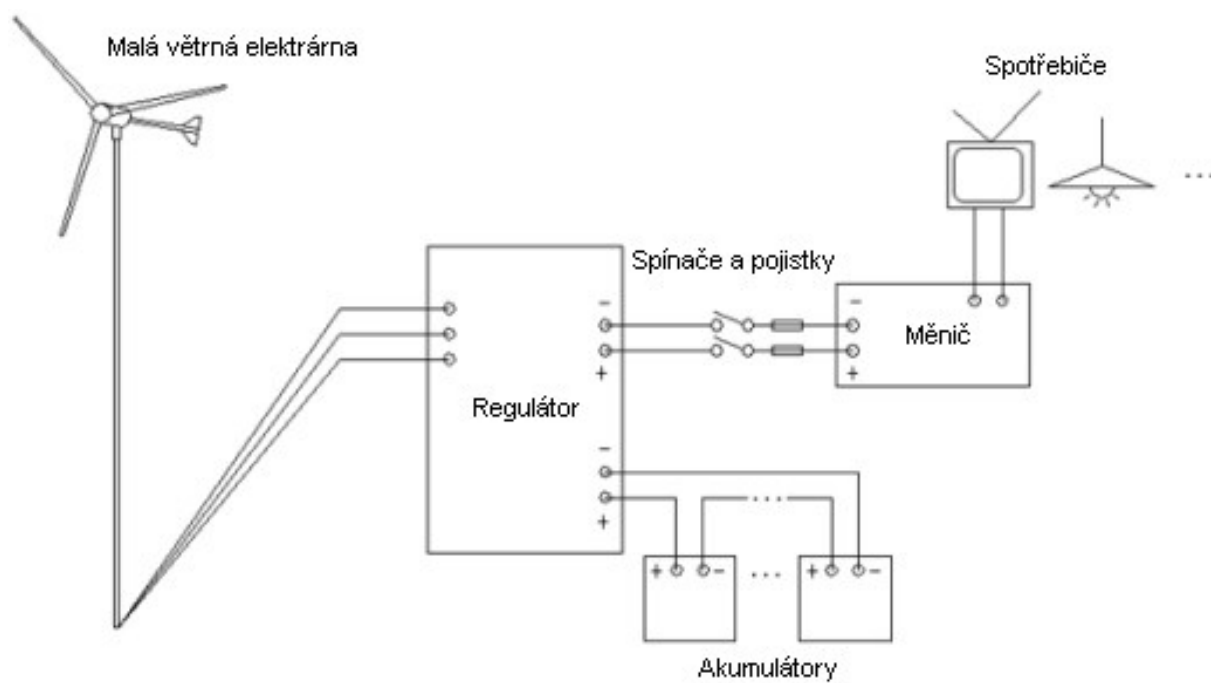
poslední doby je zvětšování výkonu větrných elektráren a zvyšování stožárů. Nejnovější zařízení instalovaná ve světě pracují s generátorem o výkonu až 3 MW, který je na tubusu dosahujícím výšky kolem 100 metrů. Důvodem jsou nižší měrné náklady na výrobu energie a optimální využití lokalit, kterých je omezený počet. K zefektivnění provozu a snížení nákladů na projektování a výstavbu se velké elektrárny sdružují do skupin (obvykle 5 až 30 elektráren) tzv. větrných farem. [2]

1.4.5 Výkonová charakteristika větrné turbíny malé větrné elektrárny

Jednotliví výrobci poskytují k větrným elektrárnám takzvané výkonové charakteristiky, které jsou nezbytné pro správný výběr větrné elektrárny pro danou lokalitu, kde bude umístěna. Výkonová charakteristika vymezuje pracovní oblast větrné elektrárny, udává závislost skutečného okamžitého výkonu na rychlosti větru. Lze z ní vyčíst, při jaké rychlosti větru je dosaženo maximálního výkonu větrné elektrárny. Je důležité všimnout si faktu, že od určitého bodu na ní, při zvyšující se rychlosti větru, výkon naopak klesá. Příkladný způsob využití tohoto výkonu malé větrné elektrárny ukazuje schéma na obr. 13, kde je energie z generátoru vedena do regulátoru a odtud může být použita buď pro napájení samotných spotřebičů, nebo například pro nabíjení akumulátorů.



Obr. 12: Typická výkonová charakteristika malé větrné elektrárny [8]



Obr. 13: Schéma zapojení malé větrné elektrárny [8]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

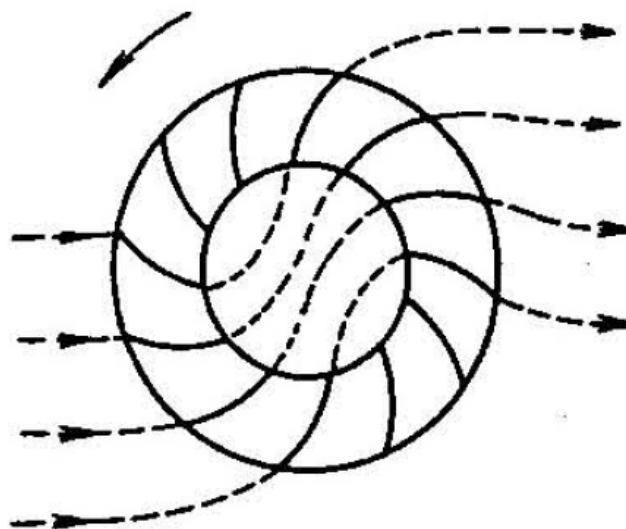
Po teoretické části práce, ve které bylo cílem seznámit se základy aerodynamiky, základními typy větrných motorů a problematikou větrných elektráren přichází na řadu praktická část. V praktické části budou simulovány povětrnostní podmínky na vlastní koncepci větrného motoru. To bude provedeno pomocí CFD softwaru, který takovéto povětrnostní podmínky dokáže simulovat a vyhodnotit jejich působení v pracovní oblasti větrného motoru. Porovnáním výsledků s naměřenými hodnotami generátoru může být vytvořena samotná výkonová charakteristika.

Postup:

1. Vytvoření 3D modelu větrného motoru. K vytvoření modelu byl použit 3D CAD systém SolidWorks.
2. Importování modelu do prostředí softwaru ANSYS Workbench, konkrétně do modulu Fluid Flow (CFX). V rámci nadefinování tohoto modulu budou probíhat veškeré výpočty a simulace, které rozeberu níže a které poslouží k pochopení chování větrného motoru pro různé rychlosti větru a pro různé otáčky rotoru.
3. Sestavení charakteristik synchronního generátoru s permanentními magnety.

2.1 Rozvržení větrné turbíny

Pro svoji simulaci jsem zvolil upravenou Lafondovu turbínu, která v základním stavu připomíná Bankiho vodní turbínu. Jedná se o pomaluběžnou turbínu s vertikální osou otáčení rotoru, která pracuje převážně na odporovém principu. Tato turbína v základním provedení využívá přibližně 16% energie větru. Rozběh větrného motoru je snadný od rychlosti větru asi $2,5 \text{ ms}^{-1}$, maximální účinnost se však odhaduje při nízké rychloběžnosti $\lambda_t = 0,5$. Rychloběžností λ_t je myšleno, že rychlost větru je vztažena na obvodovou rychlost rotoru. Vzhledem ke svému snadnému rozběhu a pomaluběžnosti se měla hodit i do nižších výšek s nerovným reliéfem povrchu, právě pro aplikace malých větrných elektráren. Tedy k napájení jednotlivých spotřebičů, případně nabíjení akumulátorů.



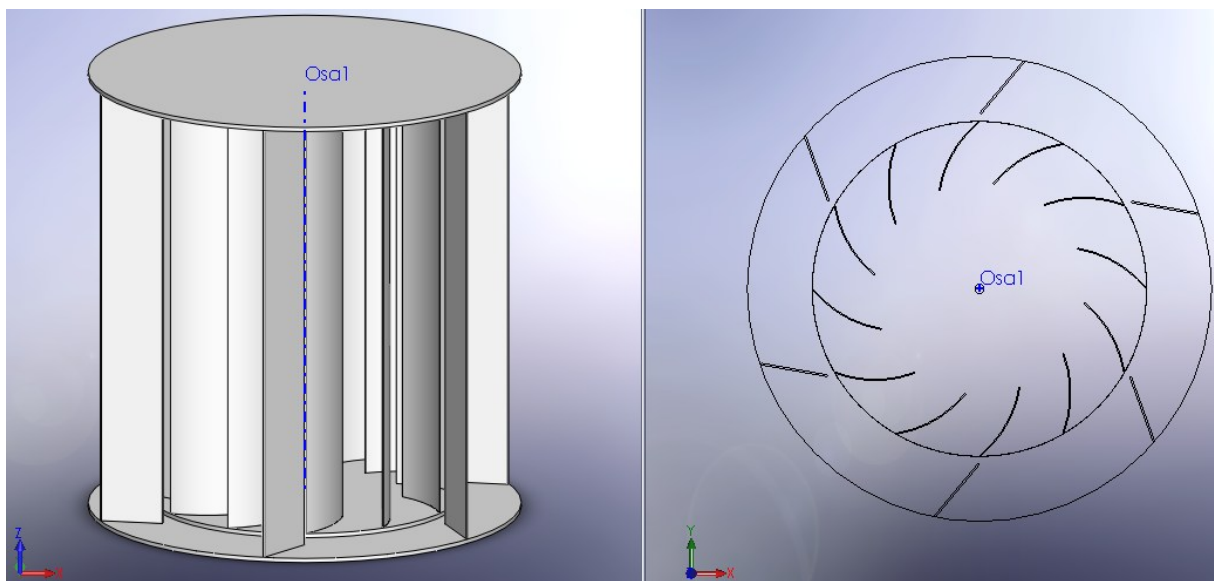
Obr. 14: Schéma rotoru Lafondovy turbíny [1]

Výhodou této turbíny je, že kromě získávání energie z větru čelní částí rotoru (ve vztahu ke směru proudícího větru) získává turbína část energie i zadní částí rotoru. Konkrétně od větru proudícího vnitřním prostorem turbíny dál. Já jsem model turbíny doplnil statickými lopatkami po obvodu statoru, které mají za úkol lépe usměrňovat proudění větru a zvyšovat tak efektivitu turbíny. Celková variabilita konstrukce je velmi velká. Počínaje délkou lopatek, jejich „prohnutí“, úhlem, který svírají lopatky s tečnou obvodu rotoru, délkou a tím samým úhlem u statických lopatek, počtem rotorových a statorových lopatek až po samotný průměr a výšku turbíny. To všechno ovlivňuje výkonový součinitel C_p a tím její účinnost a výkon turbíny. Pro srovnání budu simulovat podmínky pro totožný model větrného motoru, ovšem bez rozváděcích statických lopatek. Po srovnání výsledků by mělo být prokazatelně vidět, jak rozváděcí lopatky zvyšují účinnost tohoto typu větrného motoru.

2.2 Vytváření 3D modelu v softwaru SolidWorks

Program ANSYS dokáže vytvářet geometrii sám o sobě, ovšem podporuje i import z mnoha jiných programů, zaměřených čistě pro tuto práci, např. Inventor, Catia, SolidEdge, ProEngineer a samozřejmě již zmiňovaný SolidWorks. Já jsem k vytváření modelu zvolil SolidWorks, který je pro mě uživatelsky nejpříjemnější a jehož prostředí znám. SolidWorks je strojírenský 3D CAD software pro platformu Microsoft Windows. Zahrnuje nástroje pro 3D modelování, sestavy, výkresy, plechové součásti, svařované konstrukce a další. Nabízí jedno z nejlepších objemových modelování a vytváření 2D výrobní dokumentace. Umožňuje importovat celou řadu 2D a 3D datových formátů. Pro

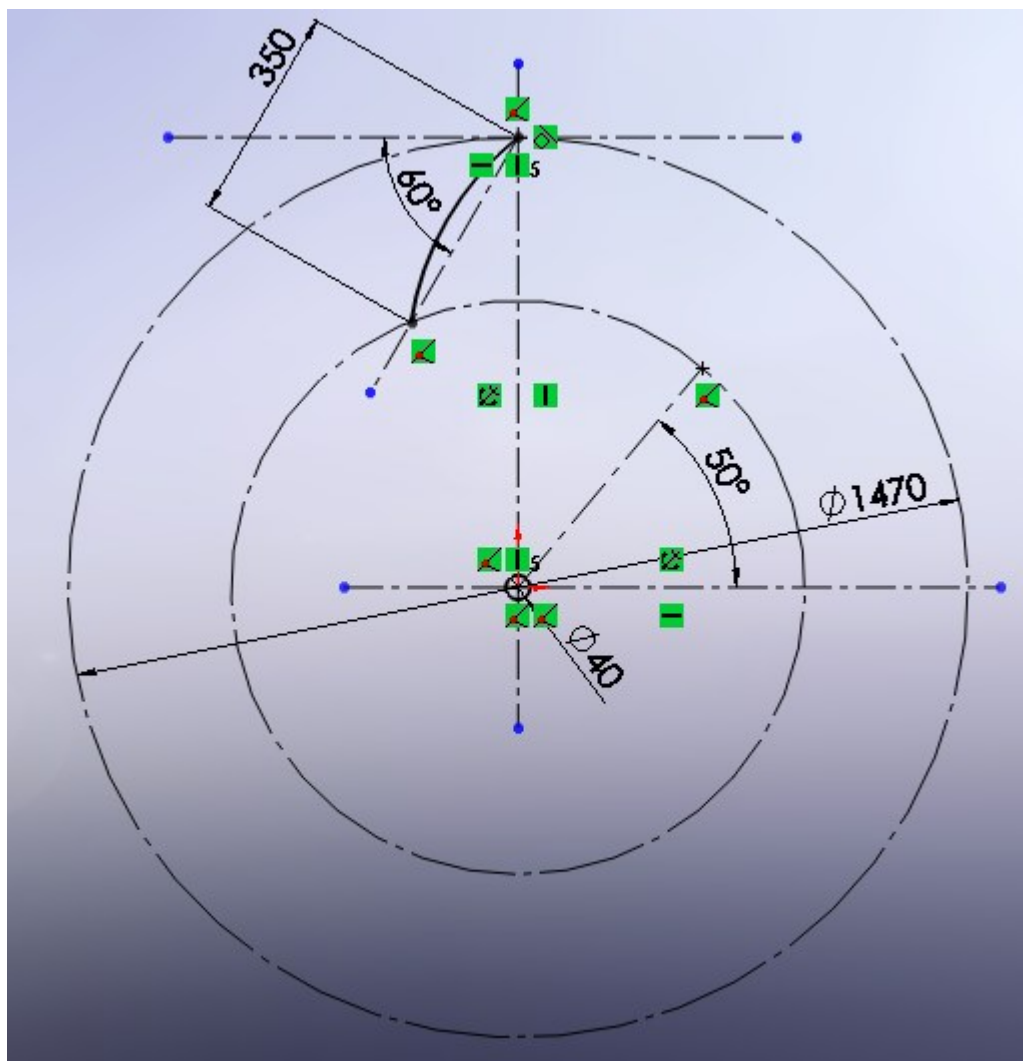
bezproblémový import do ANSYSu je nutné konečný 3D model uložit ve formátu ‚Parasolid‘, tedy s koncovkou *.x_t.



Obr. 15: Konečný model větrné turbíny, pohled zepředu a drátový profil shora

Při vytváření 3D modelu byl postup následovný. Po spuštění programu SolidWorks vytvořím nový soubor kliknutím na položku **Nový**. Z následující nabídky programu vyberu možnost **Díl**. Tímto se dostaneme do pracovního prostředí SolidWorks. Princip vytváření modelu probíhá prakticky ve dvou krocích. Prvním krokem je vytvoření 2D skici, tedy jakémusi obrysu prvku který chceme vytvořit. Druhým krokem jsou pak objemové úpravy, předně prostorové vytažení skici, existuje i možnost různého vrtání, odebírání, zaoblování, rozmnožování atd., čímž bude dokončena tvorba modelu dílu.

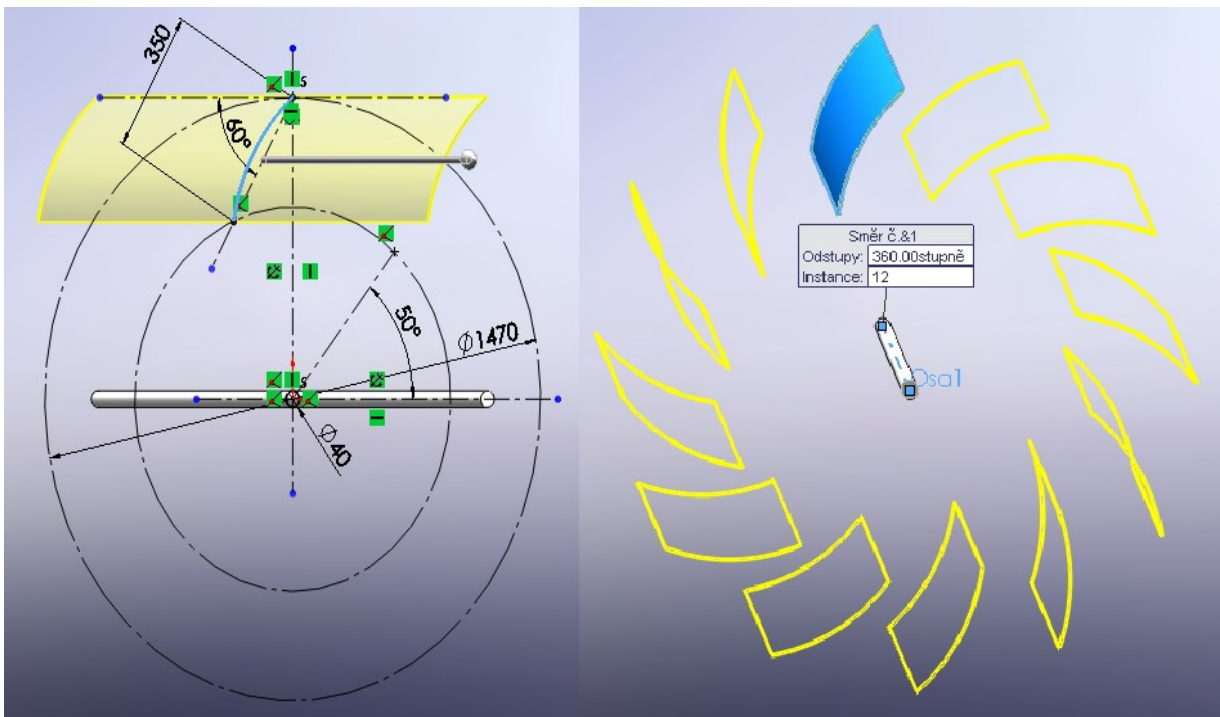
Nejprve jsem nakreslil skicu rotoru a jeho osy (viz. Obr. 16). Rozměry ve skice jsou uvedeny kótami v milimetrech, čerchované čáry jsou buď osy, nebo čáry konstrukční, tedy slouží pouze k rýsování. Zatím stačí nakreslit pouze jednu lopatku rotoru, později zdůvodním proč. Lopatka může být nakreslena mnoha způsoby. Já jsem ji vytvořil pomocí funkce **Středový oblouk**. Střed oblouku jsem umístil na konstrukční kružnici a okrajové body na konstrukční přímku. Tato přímka svírá úhel 60° s vodorovnou tečnou průměru celého rotoru. Rozměry při tvorbě oblouku jsou značně variabilní, jak účinně byla navržena, se projeví až ve výsledcích simulace. Totéž platí pro počet lopatek, jak rotorových, tak i rozváděcích statorových.



Obr. 16: Skica osy a rotoru

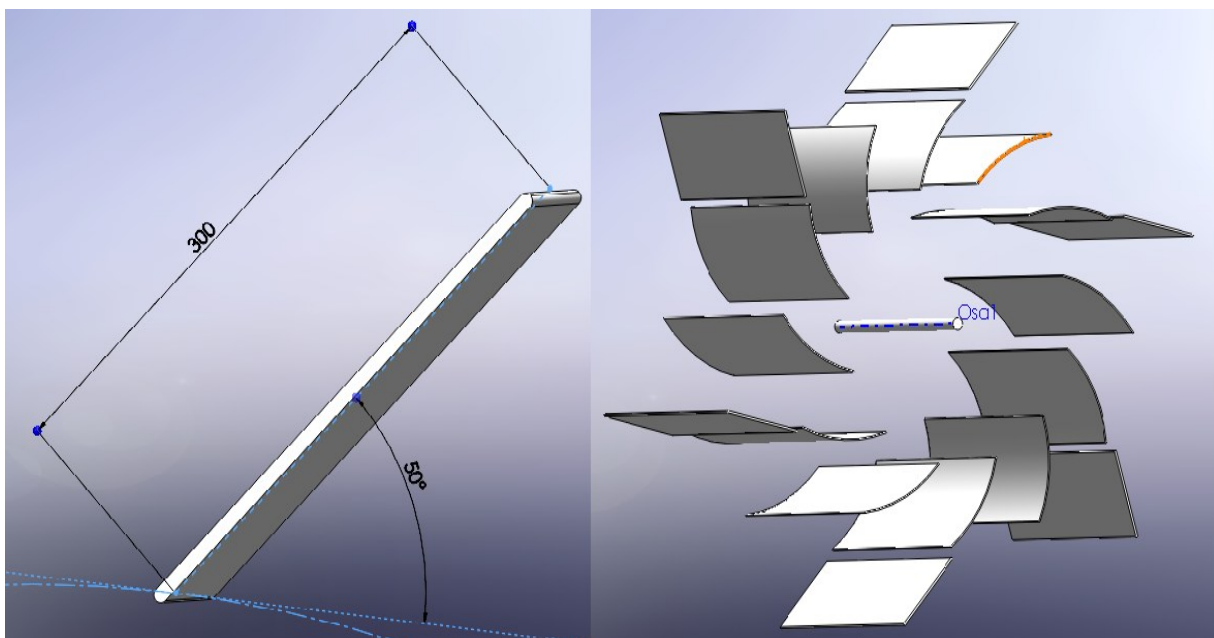
Dále musím skicu prostorově vysunout. To provedu pomocí funkce **Přidat vysunutím**. Vzhledem k průměru rotoru jsem zvolil výšku rotoru 2 m, takže prvky vysouvám o 2000 mm. U lopatky je ještě nutné zaškrtnout nabídku **Tenkostěnný prvek**, tloušťku jsem zvolil 5 mm.

Dalším krokem je zaoblení hran lopatky, k tomu slouží funkce **Zaoblit**. Může se to zdát jako kosmetická úprava, která na výsledky simulace nebude mít žádný vliv, ovšem není tomu tak. Zaoblení těchto hran značně zjednoduší tvorbu výpočetní sítě kolem těchto hran v pozdější fázi projektu. Teď přichází na řadu tvorba ostatních lopatek. Nejprve je nutné do projektu vložit referenční osu, to umožňuje v panelu nástrojů funkce **Referenční geometrie**. Tuto osu využiji pro kopírování prvků pomocí příkazu **Kruhové pole**. Tento prvek umožňuje zkopírování určitého těla a rozmístění těchto kopií na určitém poloměru kolem referenční osy rovnoměrně nebo po určitém úhlu.



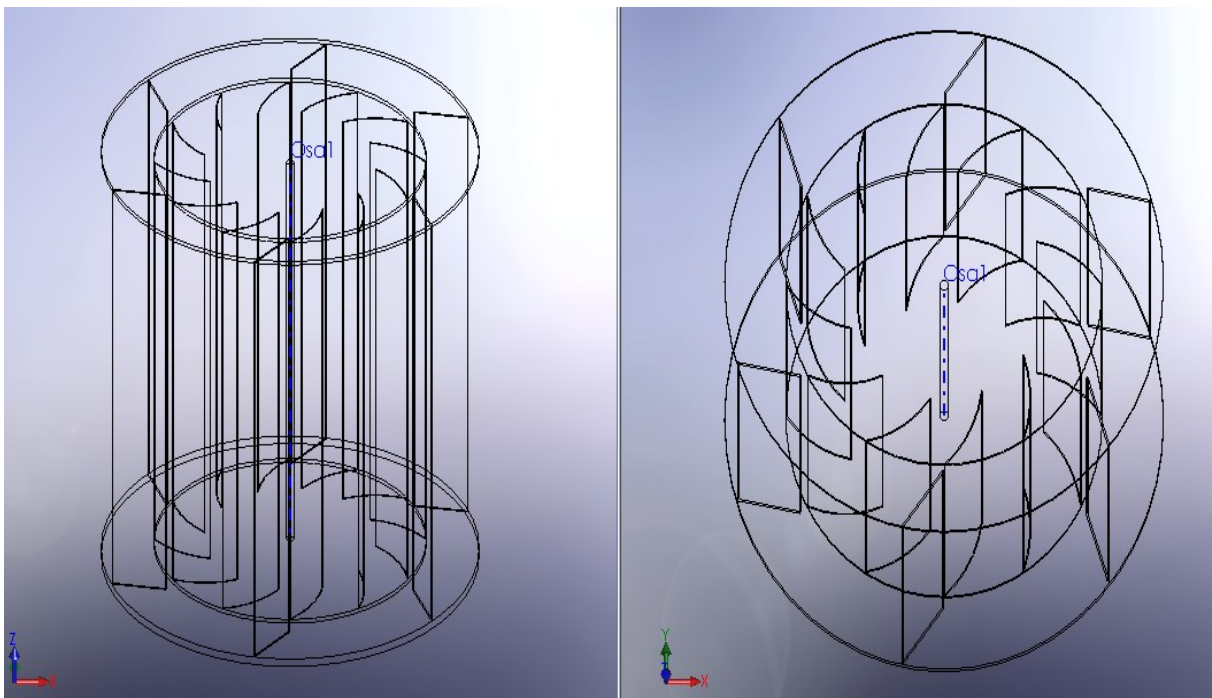
Obr. 17: Vlevo vytažení osy a lopatky, vpravo kruhové pole lopatky.

Další fází návrhu je vytvoření skici statorových rozváděcích lopatek a jejich objemové vysunutí. Postup je obdobný jako při vytváření rotorového tělesa. Nakreslím si konstrukční kružnici s průměrem o lehce větším než je průměr rotoru a středem v ose celého objektu. Na kružnici narýsuji tečnu a od ní pod určitým úhlem rozváděcí lopatku. Já jsem zvolil úhel 50° a délku rozváděcí lopatky 300 mm. Následuje objemové vytažení, rozváděcí lopatky jsou taktéž tenkostěnný prvek, tloušťku jsem volil větší než u rotorových lopatek, 8 mm. Dále je i u této lopatky potřeba zaoblit její hrany a potom pomocí funkce **Kruhové pole** rozmnožit po obvodu statoru.



Obr. 18: Vlevo rozváděcí statorová lopatka s detailem na zaoblené hrany, vpravo systém rotorových a statorových rozváděcích lopatek s osou.

Poslední část práce v software SolidWorks je dokončení turbíny přidáním horních a spodních kruhových desek, nejprve desky spojující lopatky rotoru a pak desky spojující statorové lopatky. To je opět provedeno nakreslením skic a přidání vytažením. Výsledný model je vidět na obrázcích 15 a 19. Úplně posledním krokem je uložení modelu jako soubor typu Parasolid (přípona `.x_t`), tím bude geometrie připravena pro import do ANSYS Design Modeler.



Obr. 19: Konečný model – ,drátový režim‘ zobrazení

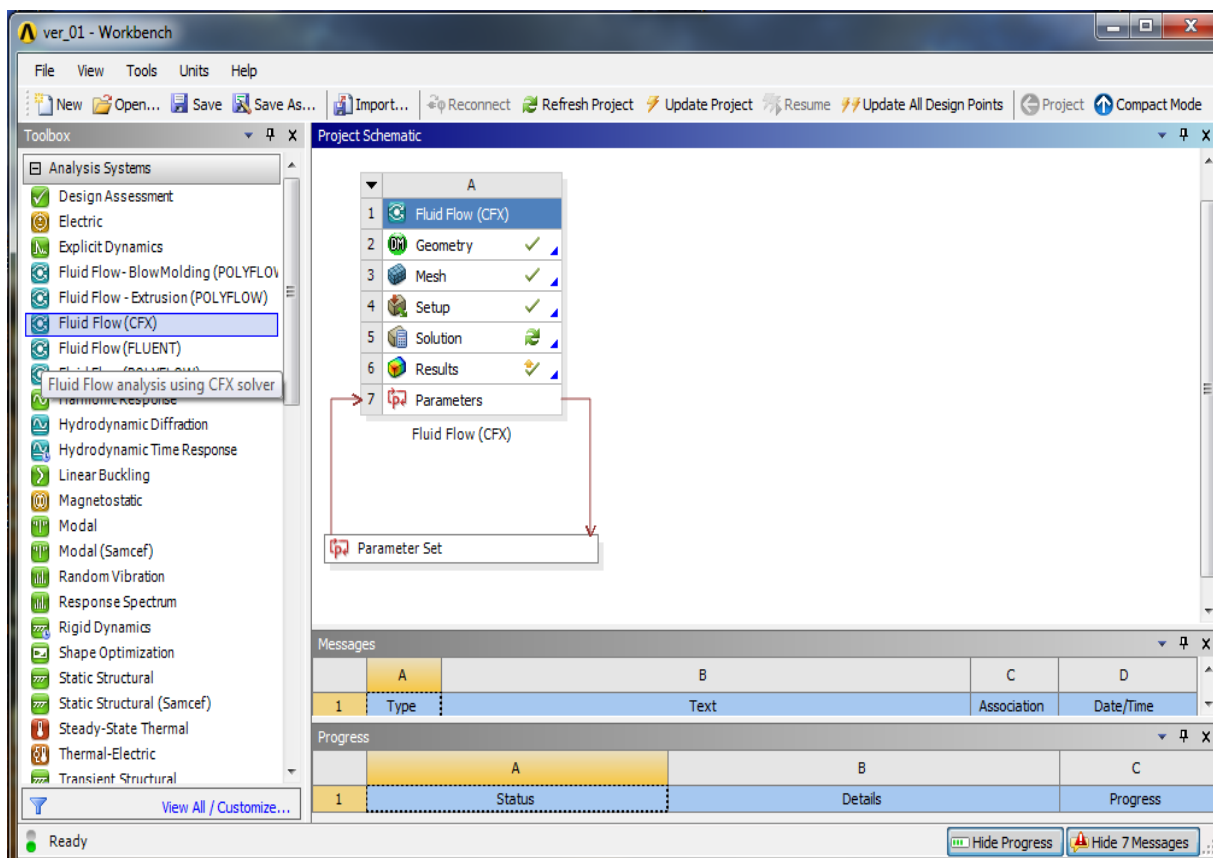
2.3 Seznámení s ANSYS Workbench

ANSYS Workbench je moderní prostředí sdružující řadu programů ANSYS a to jak pro FEM (MKP) výpočty pevnosti, dynamiky, teplotních polí, elektromagnetismu a akustiky, tak i pro CFD analýzy proudění a jejich interakci. Toto prostředí obsahuje pre a post procesory pro jednotlivé typy analýz a zároveň zabezpečuje výměnu dat mezi jednotlivými programy pro modelování multifyzikálních problémů, jako je např. vzájemné ovlivňování proudění a pevné fáze (FSI)

Pro simulaci proudění vzduchu kolem rotoru větrné turbíny je nutné použít CFD (Computational Fluid Dynamics) aplikaci, která je v softwarovém balíku ANSYS Workbench taktéž obsažena. ANSYS CFX nabízí komplexní řešení problematiky proudění, přenosu tepla a hmoty, včetně chemických reakcí a spalování. Tento nástroj umožňuje rychlé posouzení návrhu a provedení parametrické studie s cílem její optimalizace z hlediska proudění. Jsou v něm obsaženy rychlé nástroje pro přípravu geometrie (ANSYS DesignModeler), výpočetní síť (ANSYS ICEM CFD) a vyhodnocování výsledků. Pro potřebu turbinářství je dále vyvíjen modul ANSYS Blade Modeler – geometrický návrh lopatek.

ANSYS DesignModeler je geometrický 3D modelář a ANSYS ICEM CFD je osvědčeným preprocesorem pro přípravu všech typů výpočetních sítí – šesti/pěti/čtyřtěstů, pyramidových,

čtyř/trojúhelníkových elementů a nosíkových prvků se sofistikovaným importem geometrie a postupem pro generaci prvků. Program umožňuje kompletní práci s výpočetní sítí – diagnostiku, zahuštění, zředování, vyhlazování konverzí a perfektní automatizaci batch procesů a scriptování.



Obr. 20: Pracovní plocha ANSYS Workbench.

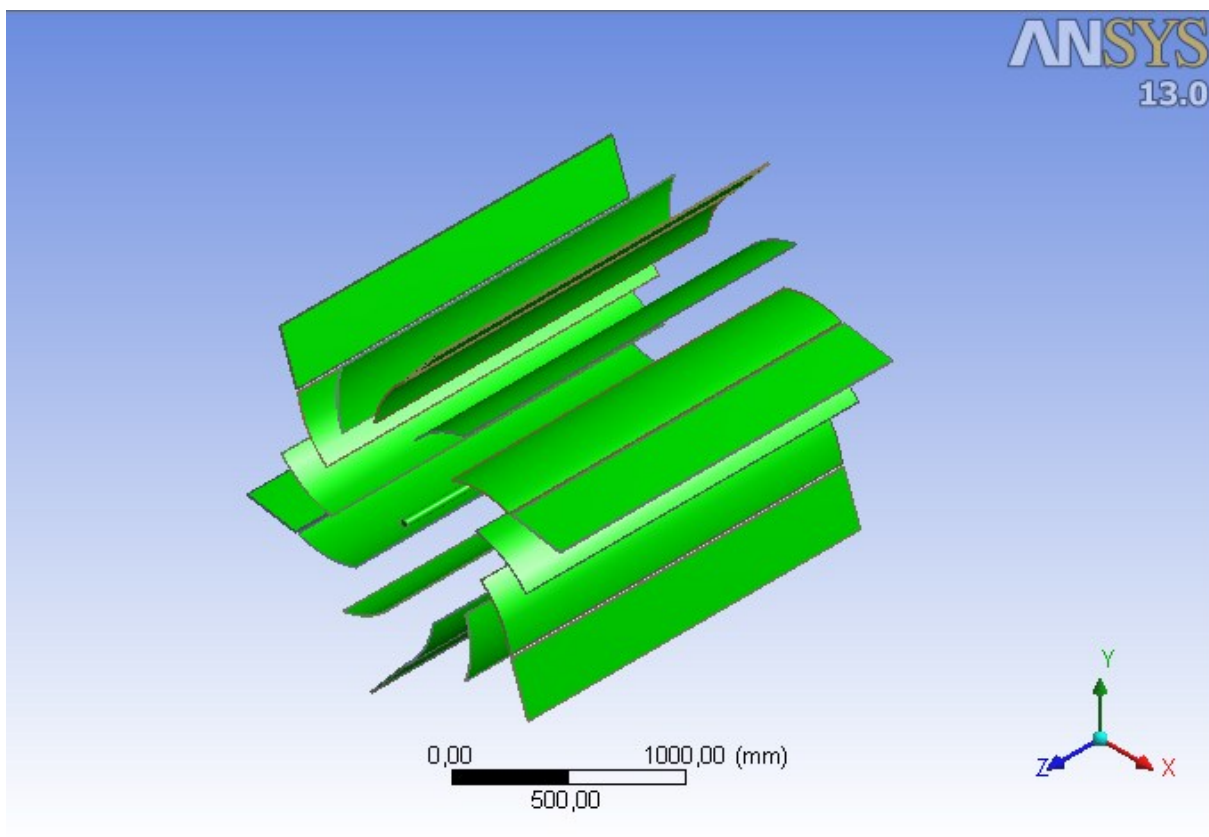
2.4 Postup práce v ANSYS Workbench

Pro simulaci proudění slouží v ANSYS Workbench modul **Fluid Flow (CFX)**. Práci započneme jednoduchým přetažením modulu z boční nabídky Toolbox na pracovní plochu. Tento modul se skládá z několika složek, jejichž postupným nakofigurováním dosáhneme potřebného zadání pro simulaci a také výsledků simulace. Jsou to tyto složky **Geometry**, **Mesh**, **Setup**, **Solution**, **Results** a **Parameters**. To můžeme vidět na obrázku 20, dále budu popisovat práci v jednotlivých složkách.

2.4.1 Vytváření geometrie prostoru simulace

K vytváření řešené geometrie slouží ANSYSu jeho vlastní software s názvem DesignModeler. Teď nastal čas souboru, který jsme dříve v SolidWorks uložili jako parasolid soubor. Kliknutím pravým tlačítkem na položku **Geometry** se rozbalí nabídka, ve které zvolím Import Geometry a importuji

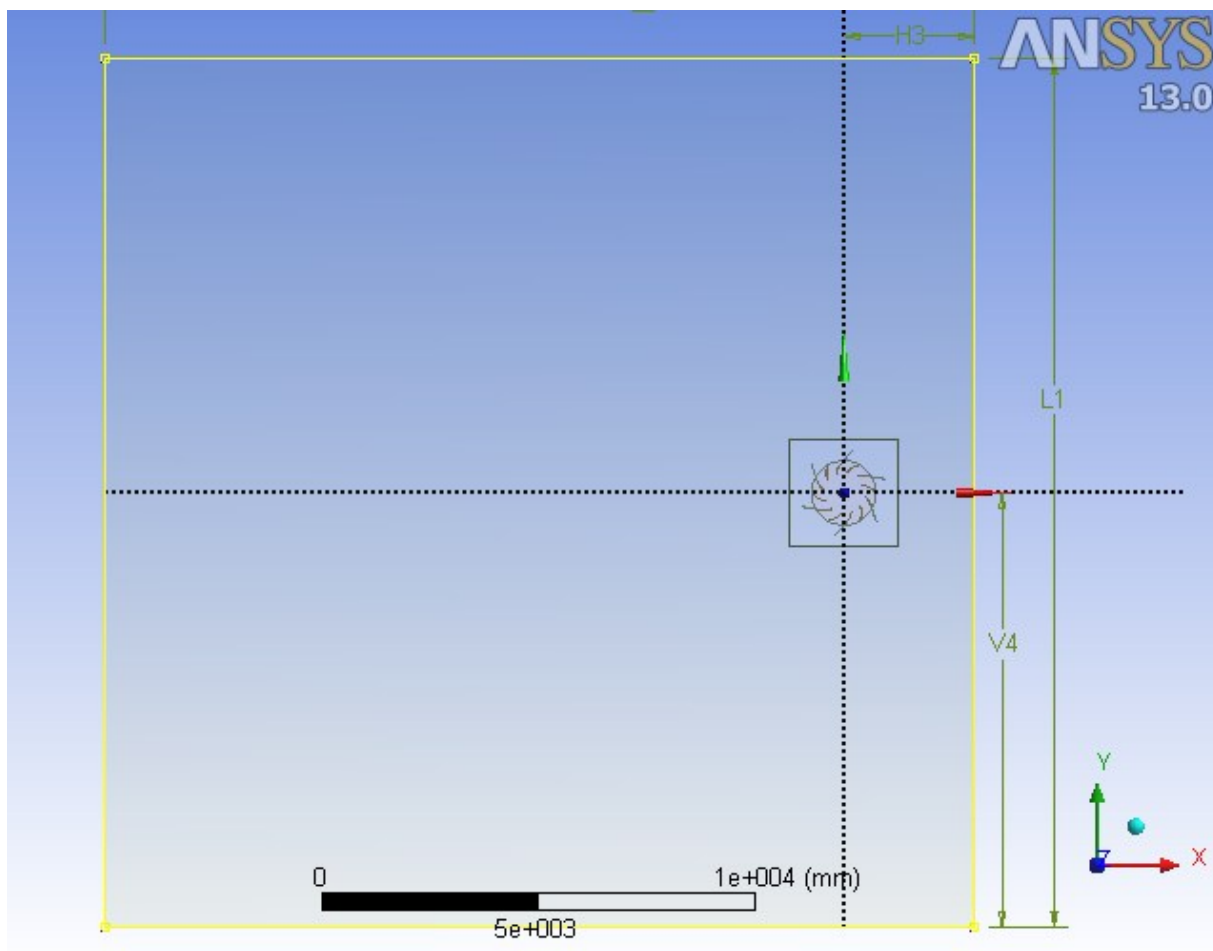
parasolid soubor s modelem turbíny. Poté opět kliknutí pravým tlačítkem myši na položku **Geometry** a z nabídky vybereme možnost Edit Geometry, a tím už se dostaneme do prostředí DesignModeler. Jako první krok software uživatele vyzve, ať vybere jednotky, se kterými bude pracovat, vybírám milimetry. V tomto softwaru je klíčové tlačítko **Generate**, kterým se aplikují veškeré změny provedené v návrhu geometrie. Takže na něj kliknu a tím vygeneruji importovaný model turbíny. Vlevo dole je okénko s detailním popisem označeného prvku, u importovaného dílu v řádku Operation musíme změnit Add Material na Add Frozen. V panelu nástrojů kliknu na položku **New plane** a poté opět Generate. Tím se vytvoří základní rovina, na které budu skicovat. Souřadnicový systém je XY.



Obr. 21: Importovaná geometrie turbíny

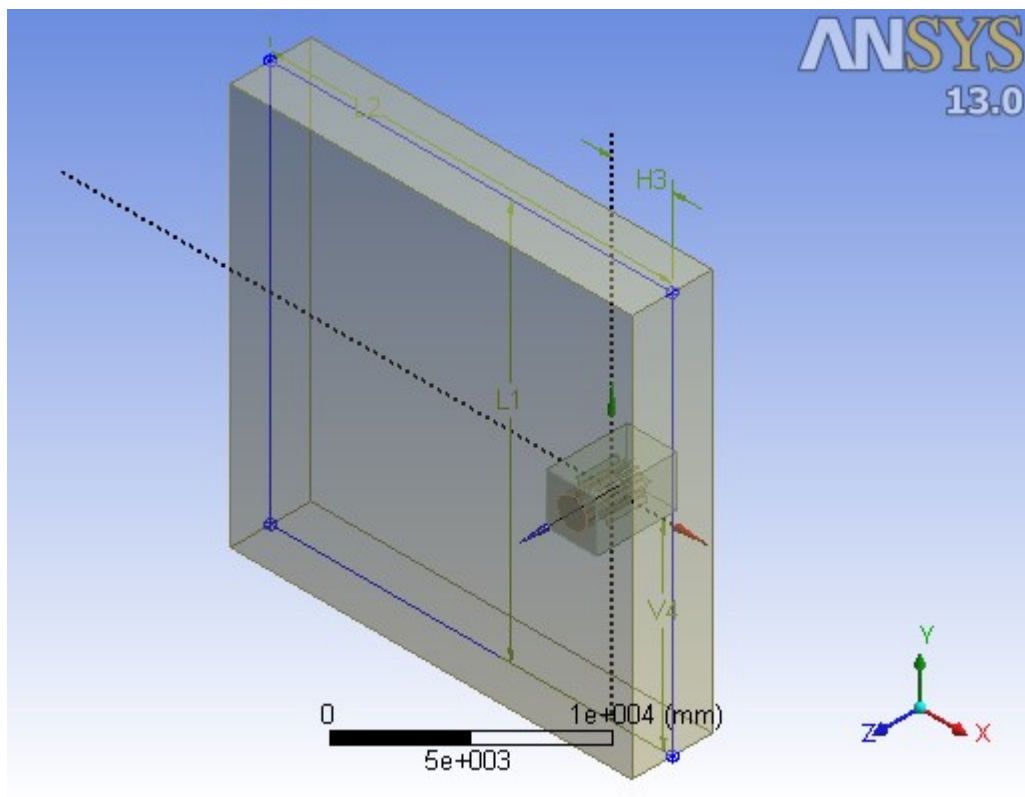
Ted' je potřeba vytvořit prostor vně i okolo turbíny. Ty prostory budou ve skutečnosti tři, prostor rotoru, statoru a okolí. Pro každý z nich vygeneruji New plane. Pro kreslení musím záložku Modeling přepnout na záložku Sketching. Pro nakreslení prostoru rotoru stačí pouhá kružnice se středem v ose, její průměr zvolím tak aby obsáhl rotorové lopatky a kousek navíc. Lopatky mají průměr 1470 mm, průměr kružnice volím 1485 mm. Obdobně postupuji při kresbě statorového okolí, místo kružnice je vhodné nakreslit čtverec o straně 2500 mm taktéž vystředěný na osu rotoru. Rozměry zadávám pomocí

funkce Dimension v záložce Sketching. Nakonec nakreslím okolí kolem turbíny, je to čtverec o straně 20 m. Je dobré, když je takový prostor velký, v zájmu ustálení proudění a přesnějších výpočtů. Turbína je umístěna v zadní části prostoru okolí z hlediska směru proudění vzduchu.



Obr. 22: Geometrie prostorů turbíny

V další části návrhu využiji modifikátoru **Extrude**, který není ničím jiným než prostorovým vytažením nakreslených prostorů ve směru osy z . Ve vlastnostech prvku Extrude přiřadíme řádku Base Object skicu kterou chceme vytáhnout. Řádek Operations musíme opět změnit z Add Material na Add Frozen. V Direction navolíme Both – Symmetric, v řádku FD1 se zadává délka vytažení a na posledním řádku Merge musíme změnit na No.

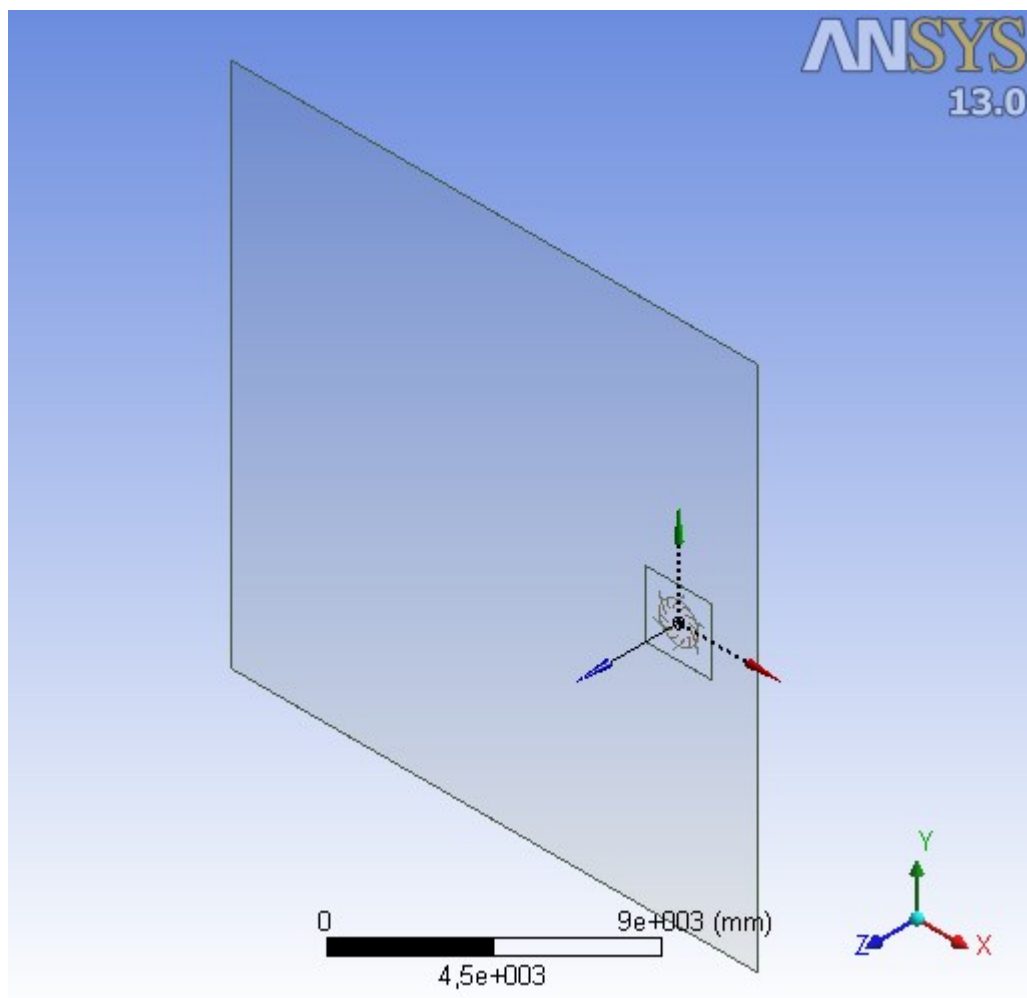


Obr. 23: Vytvořený 3D prostor kolem turbíny

Další funkcí, kterou v návrhu použiju je funkce **Enclosure**. Tento prvek umí to, že od sebe oddělí části modelu podle naší potřeby. Já do něj tedy zadám pevné části turbíny a poté je můžu odstranit tak aby na jejich místě zůstala pouze dutina. Vtip je v tom, že aplikace CFX simuluje proudění pouze v objemu vzduchu, je tedy zbytečné v návrhu těleso turbíny nechávat, tvořit v něm výpočetní síť a komplikovat si tak simulaci. Provedu to jednoduše kliknutím na funkci Enclosure, v řádku Shape je potřeba zvolit User define a vybrat těleso, a ještě v řádku Merge zadat Yes. Všechny části modelu jsou uvedeny v poslední položce v pracovním stromu s názvem Parts a Bodies, kde můžeme ty nepotřebné zakázat. To jde provést kliknutím na položku pravým tlačítkem myši a z nabídky vybrat Suppress body.

Než budu pokračovat dál, je potřeba vyjasnit jednu věc. Turbína je poměrně velká, po vytvoření výpočetní sítě by obsahovala velmi velké množství elementů a simulace by tím byly značně časově náročné. Tohoto problému se ale lze celkem snadno zbavit. Protože je turbína v celé své délce symetrická, stačilo by provést simulaci pouze na její části. Konkrétně tedy na 1 mm řezu turbínou, k získání takového řezu poslouží funkce **Slice**. V detailech prvku Slice stačí nastavit rovinu, směr a vzdálenost ve které se má řez provést. Já jsem tedy nastavil základní rovinu, směr Offset z a vzdálenost 0,5 mm. Totéž je potřeba provést v opačném směru, tedy ve vzdálenosti se zadá -0,5 mm a tím vznikne

onen řez turbínou o tloušťce 1 mm. Úloha se tak v podstatě stane dvourozměrnou, a délka výpočtů se značně zkrátí, výsledky pak stačí vynásobit číslem 2000 (turbína má výšku 2000 mm), což jde snadno nastavit v programu a ten nám zobrazí hledané výsledky. Levou a pravou část modelu opět zakážeme v položce Parts and Bodies. Tím je práce s geometrií dokončena.



Obr. 24: Výsledný řez o tloušťce 1 mm

2.4.2 Vytváření výpočetní sítě

Další, možná stěžejní, částí návrhu je vytvoření výpočetní sítě. Na tom, jak dobře vytvoříme výpočetní síť, bude záviset přesnost a správnost výsledku. Obzvláštní pozornost je potřeba věnovat místům, které nás zajímají, tedy lopatkám. Právě kolem nich je vhodné vytvořit síť co nejlépe.

V modulu Fluid Flow (CFX) kliknu pravým tlačítkem na položku Mesh, a z nabídky vyberu Edit. Otevře se pracovní plocha Meshing ANSYS ICEM CFD, ve které bude probíhat návrh sítě. V levé

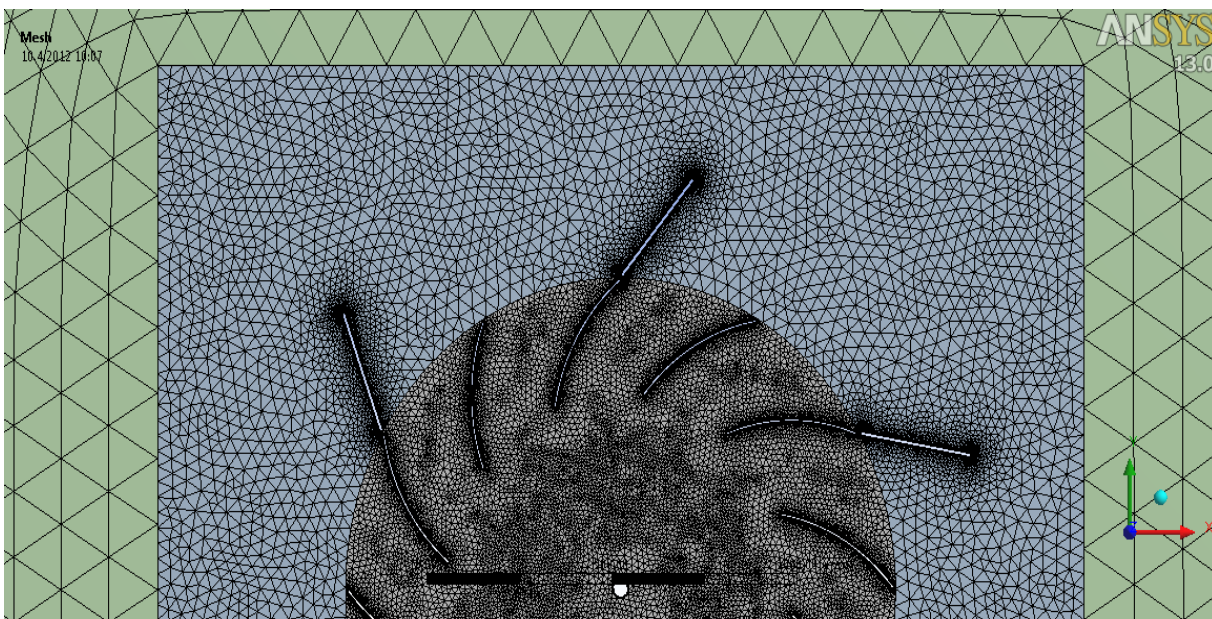
části pracovní plochy je strom projektu, ve kterém nás bude zajímat nejprve položka Mesh. Po kliknutí pravým tlačítkem myši na tuto položku a najetím na položku Insert se rozbalí nabídka několika funkcí, kterými můžeme síť definovat. Mně bude stačit využití těchto tří: **Method, Sizing a Inflation**.

Pro všechny tři prostory (rotor, stator, okolí) musím zadat funkci **Method**, jedná se o definování typu sítě. Ve všech třech případech je postup stejný, vyberu prostor, který chci zrovna nadefinovat, v kolonce Method zvolím Sweep (vysunutí sítě ve vrstvách), v položce Ssr/Trg Selection volím volbu Manual Source and Target, k Source přiřadím plochu daného prostoru, která je v kladném směru osy z , a k Target plochu daného prostoru na záporné straně osy z . Vysunutí tedy bude probíhat ve směru kolmém na vybranou plochu. Jelikož vysunutí reprezentuje tloušťku objemu, kterou zanedbáváme, počet vrstev bude v položce Sweep Num. Divs roven 1. Tvar elementů se volí v kolonce Free Face Mesh Type, já jsem zvolil All Tri, tedy trojúhelníkový tvar elementů.

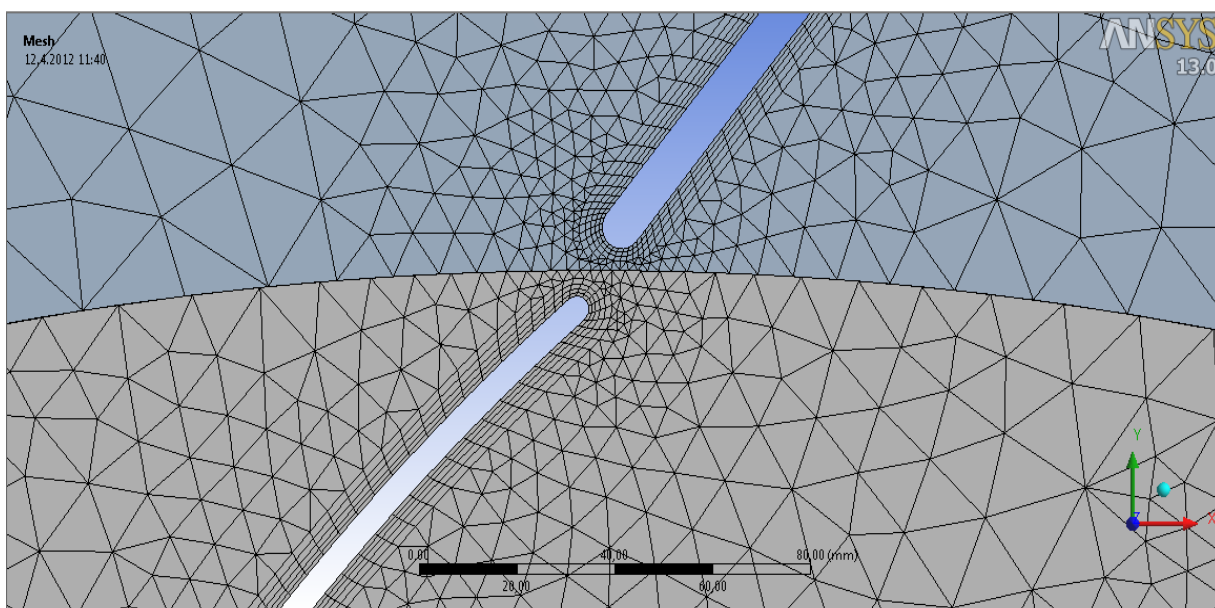
Další funkcí, kterou využiji je funkce **Sizing**. Jak název napovídá, jedná se o definování velikosti jednotlivých elementů. Parametr Sizing je univerzální, podle toho jaké zvolíme entity, bude definována velikost elementů na dané entitě, ať už se jedná o objem, plochu či hranu. Je logické, že obrovský prostor okolí nebude mít stejnou velikost elementů jako nejmenší prostor rotoru, a naopak v oblasti kolem lopatek budou elementy nejmenší. Zadávaní velikostí ve funkci Sizing je tak trochu metodou pokus-omyl, a je potřeba zkoušet různé varianty dokud nedosáhneme uspokojivého výsledku.

Třetí použitou funkcí je **Inflation**. Jedná se o zhuštění sítě a používá se pro vyšší přesnost výpočtů a vykreslení. Tuto funkci stačí použít pouze na prostory rotoru a statoru. Do kolonky Geometry zadáme plochu prostoru a do kolonky Boundary je nutné vybrat všechny hrany lopatek, které se v prostoru nachází.

Tím by byla síť nadefinována a tlačítkem **Generate Mesh** vygenerujeme výpočetní síť elementů. Moje výpočetní síť obsahuje 102 406 elementů (prvků) a 119 548 uzlů.



Obr. 25: Část výpočetní sítě.



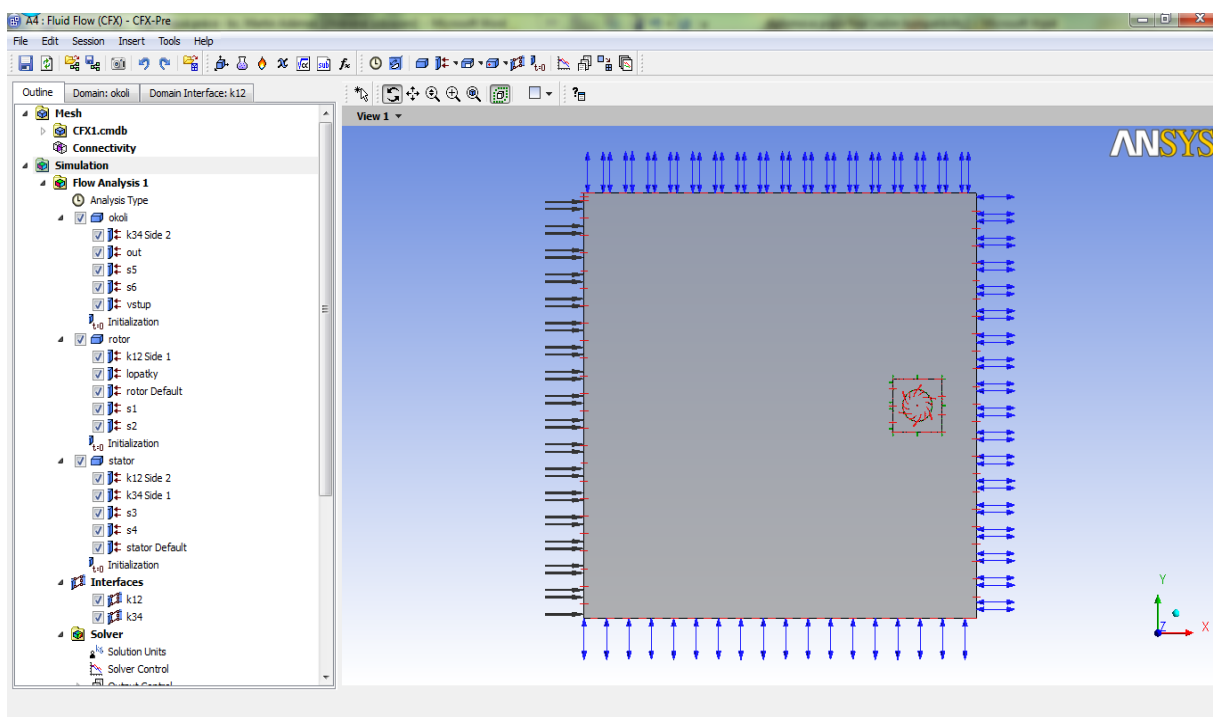
Obr. 26: Detail na výpočetní síť kolem rotorové a statorové lopatky.

Posledním krokem v této části návrhu je pojmenování důležitých oblastí, které se bude později v nastavení hodit. To se provádí pomocí poslední položky ze stromu vlevo s názvem **Named Selection**, což se bude hodit v další části návrhu. Nejprve jsem sjednotil pod jeden název všechny vnitřní plochy rotorových lopatek, totéž u statorových lopatek a pojmenoval i vnitřní plochu osy. Dále je potřeba pojmenovat přední a zadní plochy u všech tří prostorů (ve smyslu osy z), poté taky kontakty

mezi těmito prostory, tedy plochu obvodu rotoru jako k1, plochu obvodu statoru která k ní přiléhá jako k2. Totéž u přechodu z prostoru statoru do prostoru okolí. Nakonec je potřeba označit levou boční stěnu celého prostoru okolí jako vstup a zbylé tři boční stěny jako výstup. Tím je práce v této části návrhu hotova.

2.4.3 Definování úlohy z hlediska fyzikálních parametrů

Další částí návrhu je v modulu Fluid Flow (CFX) položka **Setup**. Jedná se o aplikaci CFX-Pre – preprocessor sloužící pro definování úlohy z hlediska fyzikálních parametrů. (okrajové podmínky, turbulentní/laminární model, materiál, atd.) Otevřu jej přes volbu Edit po kliknutí pravým tlačítkem na položku. V nabídce nové simulace volím General – spuštění standartního grafického rozhraní pro manuální definici úlohy. Po načtení je v levém sloupci vidět pracovní strom programu, se kterým budu pracovat. Vždy je v něm automaticky vytvořena tzv. Default Domain (vnitřek výpočtové oblasti) pod položkou Flow Analysis, kterou nejprve vymažu a pak přes volbu Insert vložím tři nové domény (pro každý prostor jednu), které pro modifikaci otevřu dvojklikem.



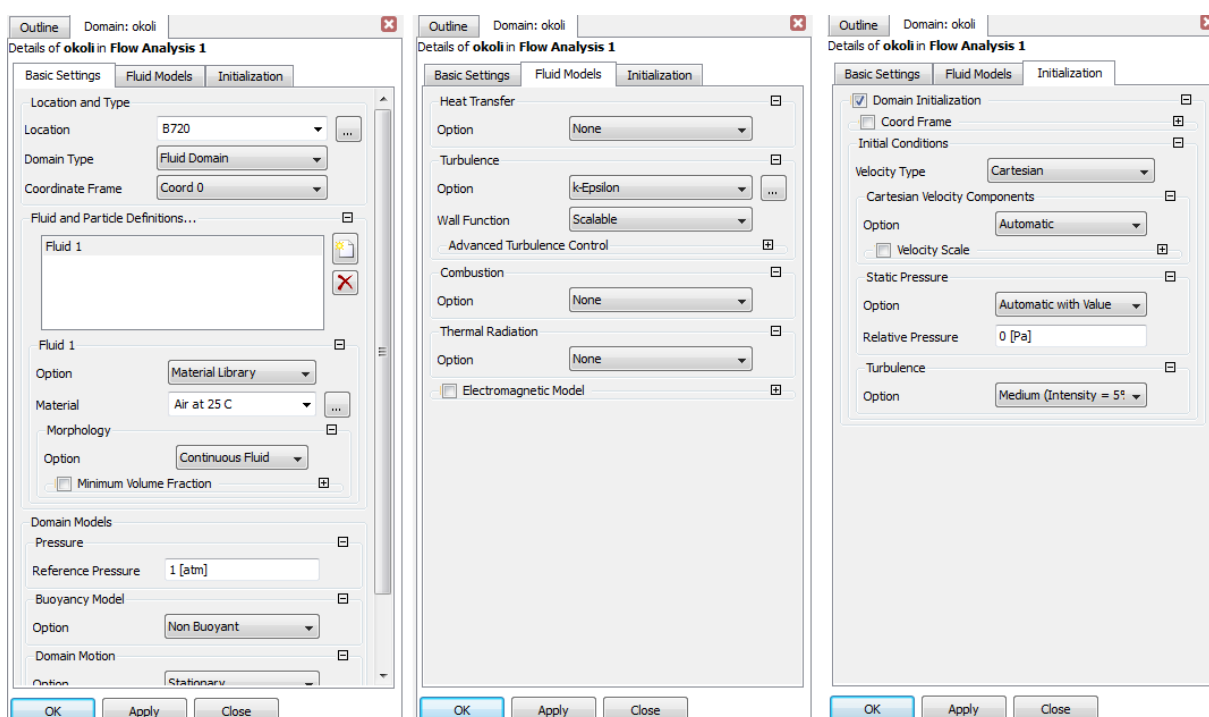
Obr. 27: Pracovní plocha CFX - Pre

Doména obsahuje tři záložky s vlastnostmi výpočetní oblasti: **Basic Settings**, **Fluid Models** a **Initialisation**.

V **Basic Settings** volíme Location, prostor na který se nastavení vztahuje, typ domény (v mém případě Fluid domain, označuje kapalinu, ale platí i pro vzduch), v kolonce Material ponecháme Air at 25°C. Reference Pressure označuje referenční tlak pro výpočet, ponecháme klasicky 1 atm, Buoyancy – zahrnutí vztahu do výpočtu můžu ve svém případě zanedbat tedy Non Buoyant. Domain Motion je zahrnutí pohybu oblasti do výpočtu, pro oblasti okolí a statoru platí Stationary, pouze pro oblast rotoru musíme volbu změnit na Rotating.

V další záložce **Fluid Models** určujeme model tekutiny, v mém případě není potřeba nic nastavovat.

V poslední záložce **Initialisation** taktéž není potřeba nic měnit.



Obr. 28: Záložky funkce Domain

V dalším kroku je nutná tzv. definice okrajových podmínek, jinými slovy musíme definovat vlastnosti stěn výpočtové oblasti. To se provádí pomocí funkce **Boundary** v nabídce Insert pro jednotlivé domény. Jelikož je výpočet definován jako 2D je nutné definovat boční plochy jednotlivých prostorů ve směru osy z . Této okrajové podmínce se říká symetrie a v Boundary Type je musíme zadat jako Symmetry (červené šipky). Pro kontaktní plochy mezi prostory platí volba Interface. U lopatek rotoru platí možnost Wall, protože představují fyzickou překážku v prostoru. Vzdálenější stěnu prostoru okolí ve vztahu k větrnému motoru je třeba označit za Inlet, to je zdroj proudění vzduchu (v zobrazení se to projeví černými šipkami směřujícími dovnitř modelu) a také se v podmínce musí zadat proměnná

v kolonce pro rychlost vzduchu. Zbylé tři obvodové stěny nadefinujeme jako Opening (modré obousměrné šipky) s Relative Pressure 0, tedy otevřený prostor kterým může médium vstupovat i vystupovat. Plochy, které není potřeba definovat, budou uvedeny v okrajové podmínce Default.

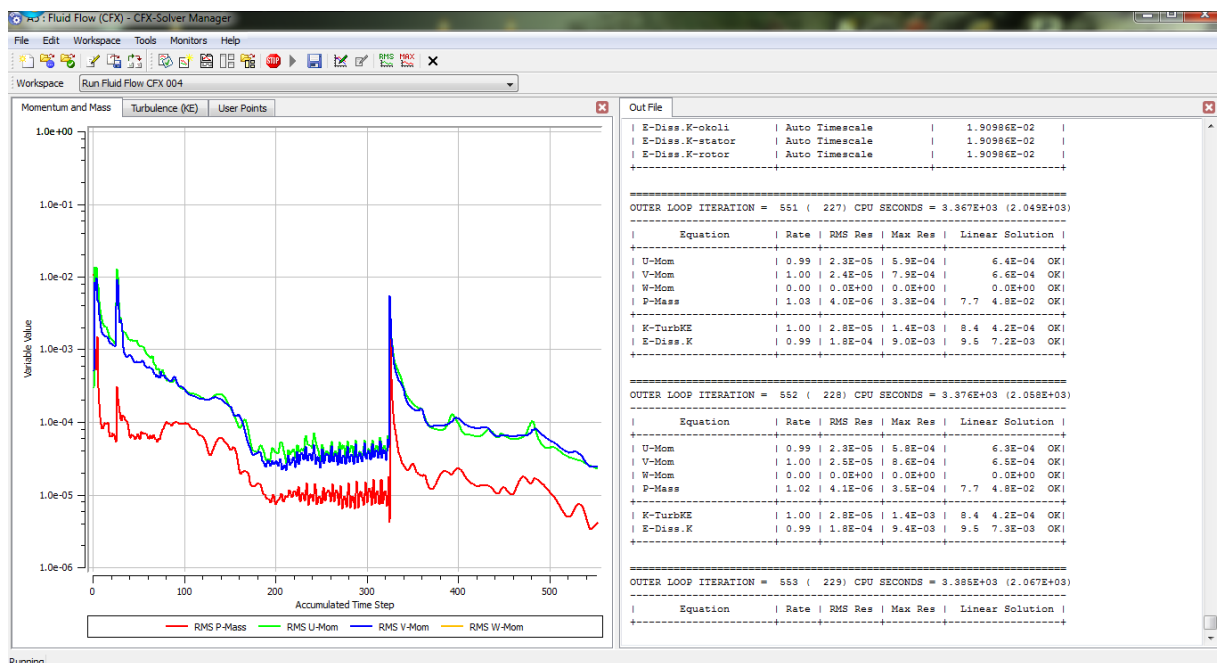
Dále je potřeba přes funkci Insert vložit Domain Interface, jednou pro kontaktní plochy rotoru a statoru a podruhé pro kontakt mezi statorem a okolím.

Nyní přichází na řadu nadefinování samotného řešiče přes položku **Solver Control**. Zde jsou pro mě nejpodstatnější volby Max. Iterations (volba počtu iterací) a Residual Target. Iterace je doslova řešení problému postupným opakováním s dalším a dalším přibližováním se žádoucímu výsledku, přičemž každý aktuální výsledek ovlivňuje následující výpočet. Residual Target zase definuje přesnost výpočtu neboli hranici pro konvergenci výpočtu. Pro přesný výpočet jsem zvolil Residual Target = 0,00001, a zkoušením bylo zjištěno, že této přesnosti řešič bezpečně dosáhne po 300 iteracích.

Posledním krokem práce v této části návrhu je nadefinování proměnných pomocí položky **Expressions** přes volbu Insert Expression. Je potřeba nadefinovat otáčky rotoru a rychlost větru, to jsou vstupní proměnné, které můžeme později upravovat pomocí položky **Parameters**, která je součástí modulu Fluid Flow (CFX). Jako výstupní proměnnou je třeba zapsat kroutivý moment M pomocí rovnice $2000 * \text{torque_z}() @ \text{lopatky}$. Program tím spočítá kroutivý moment ve směru osy z na lopatkách a vynásobí to dvěma tisíci, protože simulaci provádím na 1 mm tlustém řezu a rotor má výšku 2 m.

2.4.4 CFX Solver – řešení úlohy

Pod položkou **Solution** se skrývá CFX – Solver. Jedná se o řešič, sloužící pro provedení CFD výpočtu a zapsání výsledků do souboru. CFD (Computational Fluid Dynamics) doslova znamená výpočetní dynamika plynů. Proudění tohoto plynu či kapaliny je popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) – matematický model. Tyto rovnice není možné řešit analyticky, proto využívá k řešení konvergentní metodu konečných prvků s využitím zákonů zachování. Jde o numerickou metodu využívající integrálního tvaru bilančních rovnic a aproximace toků přes hranice kontrolního objemu. Po dosažení požadované přesnosti a provedení 300 iteračních kroků se běh úlohy ukončí a výsledky se vyhodnotí v postprocesoru CFX – Post. Průběh konvergence výpočtu můžeme zobrazit volbou Display Monitor v nabídce položky Solution.

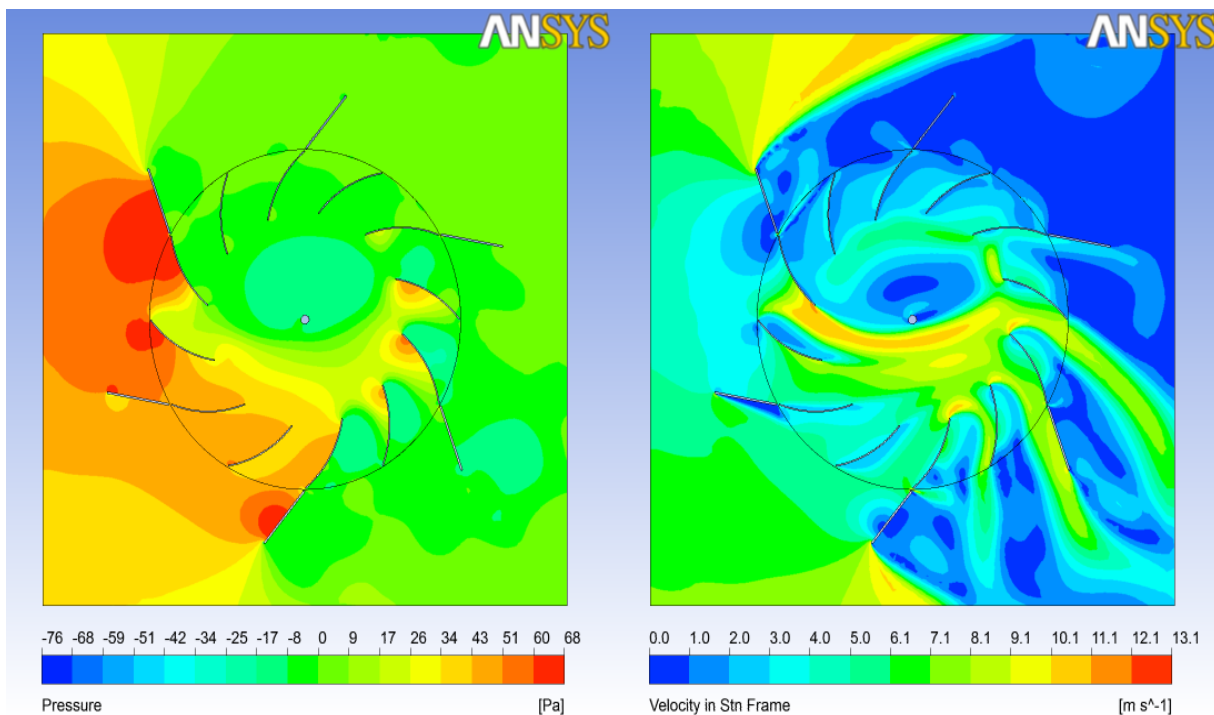


Obr. 29: Průběh konvergence výpočtu v CFX - Solver

2.4.5 CFX Post – grafické vyhodnocení

Další položka **Results** obsahuje postprocesor sloužící pro grafické vyhodnocení výsledku simulace (vyhodnocovací roviny, body, přímky, konturované obrázky, vektorová pole, atd.). Pro můj případ je vhodné zobrazit si rozložení tlaku a rychlosti větru v oblasti turbíny pomocí kontur. Kontury přidám kliknutím na ikonu **Contour** a objeví se panel pro definování vlastností konturového obrázku. V kolonce Variable jsou na výběr vlastnosti k zobrazení, pro jednu konturu vybírám Pressure (tlak) a pro druhou Velocity in Stn Frame (rychlost větru, to Stn Frame znamená, že program dotvoří v kontuře plynulé přechody mezi rychlostmi).

Na obrázku 30 je konturami vlevo zobrazeno rozložení tlaku v oblasti rotoru a vpravo rychlost proudění vzduchu. Tento obrázek odpovídá rychlosti větru $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$ a otáčkám rotoru $n = 40 \text{ min}^{-1}$. Z obrázků lze vyzorovat, na jaká místa turbíny působí největší tlak a jakým způsobem motorem prochází proudící médium, v praxi vítr. Ostatní vizualizace jsou uvedeny v přílohách. Pro každou simulovanou rychlost větru jsem uvedl příslušné kontury pro případ nulových otáček (rozběh turbíny) a pro otáčky, při kterých byl zjištěn největší výkon.



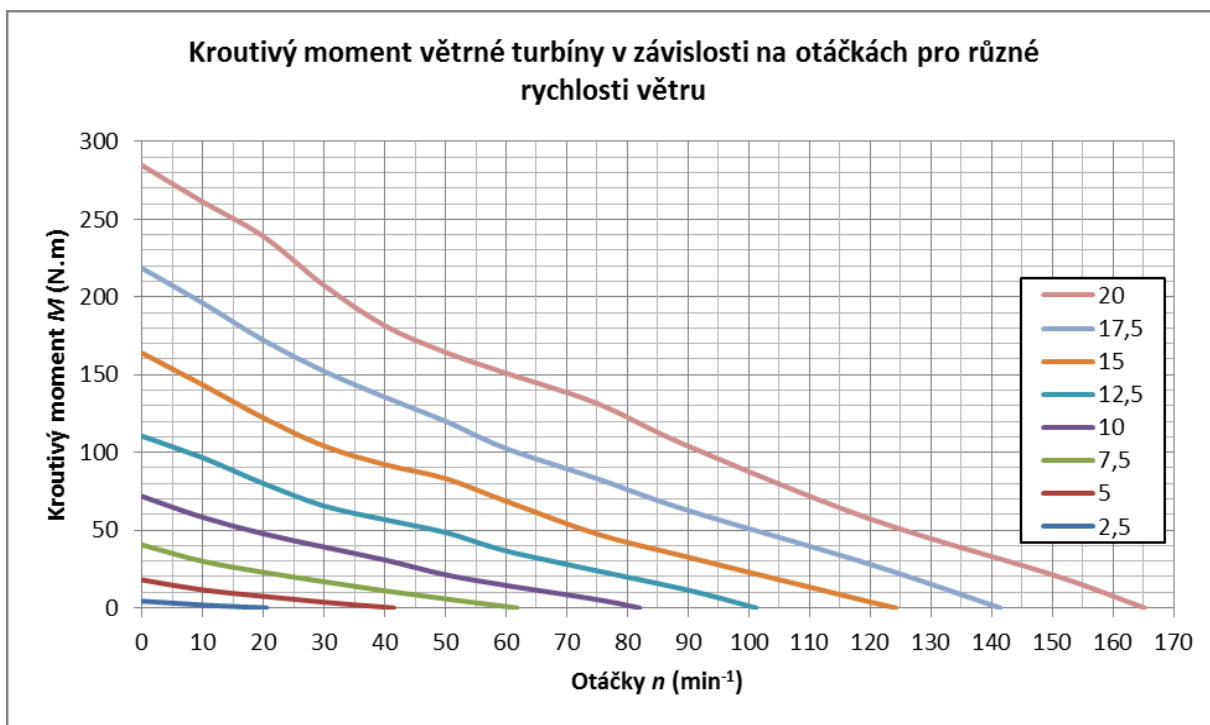
Obr. 30: Konturové rozložení tlaku a rychlosti větru v prostoru rotoru.

2.4.6 Volba parametrů simulace

Poslední částí modulu Fluid Flow (CFX) je položka **Parameters**, která v sobě obsahuje aktuální tabulku vstupních a výstupních parametrů projektu. Také obsahuje tabulku takzvaných Design Points (DP). Každý DP obsahuje v mém případě dvě vstupní proměnné, otáčky rotoru n (min^{-1}) a rychlost proudění vzduchu v (m.s^{-1}), a jednu výstupní proměnnou, konkrétně kroutivý moment síly M (N.m). Tento moment síly zapíše do tabulky řešič ihned po vyřešení úlohy. Takže po zadání potřebných vstupních parametrů už jen stačí kliknout na ikonu Update All Design Points a úloha se začne řešit. Cílem simulace bylo zjistit kroutivý moment pro různé otáčky rotoru s ustáleným prouděním vzduchu. Zvolené rychlosti proudění vzduchu a otáčky rotoru jsou i s výsledky kroutivého momentu uvedeny v tabulce 1.

| Rychlost větru v (m.s^{-1}) | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 |
|--|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Otáčky n (min^{-1}) | Krouťivý moment M (N.m) | | | | | | | |
| 0,0001 | 4,34 | 18 | 40,56 | 71,74 | 110,5 | 163,94 | 218,48 | 284,7 |
| 10 | 1,88 | 11,57 | 29,97 | 58,23 | 96,59 | 143,49 | 196,13 | 261,19 |
| 20 | 0,08 | 7,44 | 22,91 | 47,65 | 80,04 | 122,25 | 172,18 | 238,98 |
| 30 | -1,07 | 3,65 | 16,83 | 39,2 | 65,59 | 104,12 | 152,26 | 207,5 |
| 40 | - | 0,48 | 10,98 | 30,86 | 56,77 | 92,22 | 135,6 | 181,57 |
| 50 | - | -2,45 | 5,82 | 21,34 | 48,52 | 83,24 | 120,58 | 164,46 |
| 60 | - | - | 0,9 | 14,48 | 36,69 | 68,61 | 102,58 | 151 |
| 75 | - | - | -5,52 | 5,37 | 23,89 | 47,59 | 83,14 | 131,53 |
| 90 | - | - | - | -5,84 | 11,41 | 32,61 | 62,65 | 104,08 |
| 120 | - | - | - | - | -15,36 | 3,82 | 28,05 | 57,24 |
| 150 | - | - | - | - | - | -22,27 | -9,72 | 21,4 |
| 180 | - | - | - | - | - | - | - | -19,43 |

Tab. 1: Tabulka výsledných krouťivých momentů upravené Lafondovy turbíny



Obr. 31: Graf závislosti krouťivého momentu na otáčkách

V grafu na obrázku 31 je vidět, že turbína se sice rozbíhá už při rychlosti větru $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ a se stoupající rychlostí větru má poměrně dobrý statický moment, ovšem se stoupajícími otáčkami moment síly rychle klesá. To je nejspíš způsobeno velkým počtem lopatek. I když se už při této nejnižší simulované

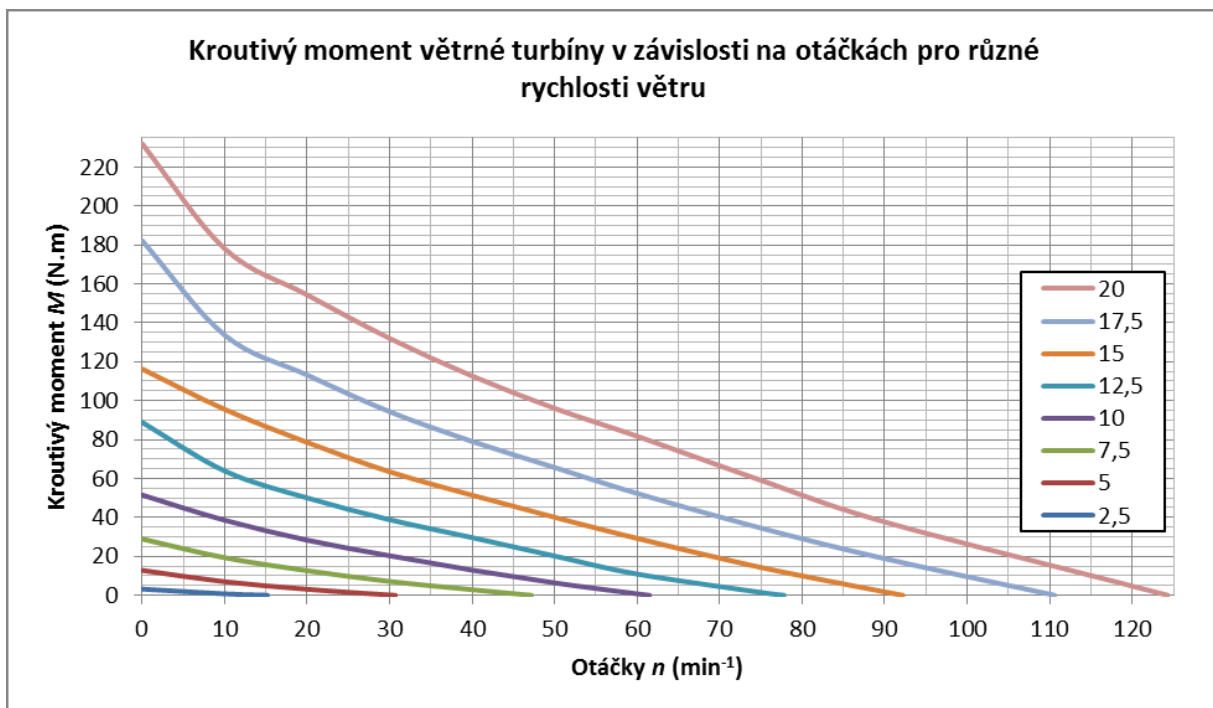
rychlosti rotor roztáčí, dosáhne maximálně 20 otáček za minutu a to z hlediska připojeného generátoru nebude vhodné. Oproti tomu pro nejvyšší simulovanou rychlost větru 20 m.s^{-1} dosáhl rotor více než 160 otáček za minutu. To není špatné, ale tak velká rychlost větru je spíše ojedinělá a tak nemůžeme brát tyto otáčky jako pracovní. Jelikož je motor řešen spíše pro přízemní aplikaci, bylo by nejvhodnější uvažovat s rychlostmi větru do 10 m.s^{-1} , při kterých může rotor dosáhnout až 80 otáček za minutu. Tyto otáčky se dají pokládat za pracovní.

Tatáž simulace byla provedena na standartním typu Lafondovy turbíny bez rozváděcích desek.

| Rychlost větru $v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$ | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Otáčky $n \text{ (min}^{-1}\text{)}$ | Krouťivý moment $M \text{ (N.m)}$ | | | | | | | |
| 0,0001 | 3,20 | 12,84 | 28,96 | 51,56 | 88,93 | 116,36 | 182,33 | 232,14 |
| 10 | 0,78 | 6,99 | 19,34 | 38,59 | 63,92 | 95,57 | 133,73 | 178,15 |
| 20 | -0,63 | 3,10 | 12,64 | 28,35 | 50,04 | 78,57 | 113,20 | 154,41 |
| 30 | - | 0,18 | 7,15 | 12,93 | 38,87 | 63,48 | 94,38 | 132,07 |
| 40 | - | -2,28 | 2,87 | 6,37 | 29,67 | 51,46 | 79,08 | 112,69 |
| 50 | - | - | -1,08 | 0,77 | 20,19 | 40,09 | 65,68 | 96,08 |
| 60 | - | - | - | -6,32 | 10,92 | 29,27 | 52,38 | 81,74 |
| 75 | - | - | - | - | 1,48 | 14,30 | 34,54 | 59,12 |
| 90 | - | - | - | - | -6,24 | 1,75 | 18,84 | 37,69 |
| 120 | - | - | - | - | - | -21,83 | -8,41 | 4,72 |
| 150 | - | - | - | - | - | - | - | -27,22 |

Tab. 2: Tabulka výsledných krouťivých momentů standartní Lafondovy turbíny

Na grafu v obrázku 32 je vidět, že tradiční Lafondova turbína bez pomocných rozváděcích desek na lepší přívod větru má jak nižší statický (rozběhový) krouťivý moment, tak i strmější pokles dynamického momentu se stoupajícími otáčkami. Zároveň dosahuje nižších maximálních otáček oproti vylepšenému typu. Při nejnižší rychlosti větru rotor nedosáhne ani 20 otáček za minutu a pro nejvyšší rychlost větru bude mít něco přes 120 otáček za minutu. Vzhledem k tomu, že výsledky této simulace vyšli prokazatelně hůře, což bylo cílem dokázat, nebudu se o tomto řešení konstrukce více rozepisovat.



Obr. 32: Graf závislosti kroutivého momentu na otáčkách

První hodnota otáček 0,0001 představuje nulové otáčky, tedy stav kdy se rotor netočí a výsledný moment síly je statický. Nelze použít čistou nulu, vyhodnocovací software by s ní měl problémy, ale můžeme předpokládat, že při otáčkách 0,0001 bude chyba zanedbatelná. Po otáčkách, kdy výsledný moment začne být záporný, může být výpočet přerušen. Záporný moment znamená, že rotor těchto otáček nikdy nedosáhne, čili počítání momentu pro vyšší otáčky je zbytečné.

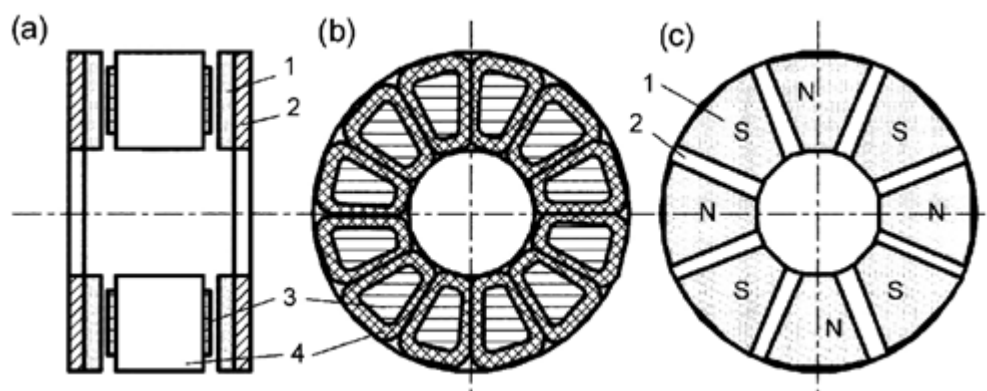
2.5 Synchronní generátor s permanentními magnety

Generátor elektrického proudu je nezbytnou součástí každé větrné elektrárny. Právě tato část převádí mechanickou energii získanou z větru na elektrickou energii, a může se říct, že správná volba generátoru je stejně důležitá jako samotný návrh větrné turbíny.

Jelikož Lafandova turbína je pomaloběžný typ větrného motoru, nejvhodnější pro ni bude použití synchronního generátoru s permanentními magnety známého také jako bez-kartáčový stejnosměrný stroj s permanentními magnety (Brushless Permanent Magnet DC Motor). Podobně jako u asynchronních strojů se i zde můžeme setkat s variantami konstrukčního uspořádání s vnitřním či vnějším rotorem.

K dispozici jsem dostal charakteristiky generátoru, který byl zkonstruován jiným studentem Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava jako téma jeho bakalářské práce. V rámci bakalářské práce byl generátor kompletně proměřen, a proto ho použiji ve svém návrhu. Na internetu jde dohledat mnoho generátorů, které by možná lépe odpovídali parametrům větrné turbíny, ovšem výrobci k nim neposkytují potřebné naměřené hodnoty.

Jedná se o osmi-pólový axiální stroj s vnitřním statorem s vyniklými póly a dvojitým vnějším rotorem. Uspořádání motoru s axiálním magnetickým polem (diskový motor) bylo zvoleno kvůli vysoké hustotě výkonu na jednotku objemu (hmotnosti) stroje.



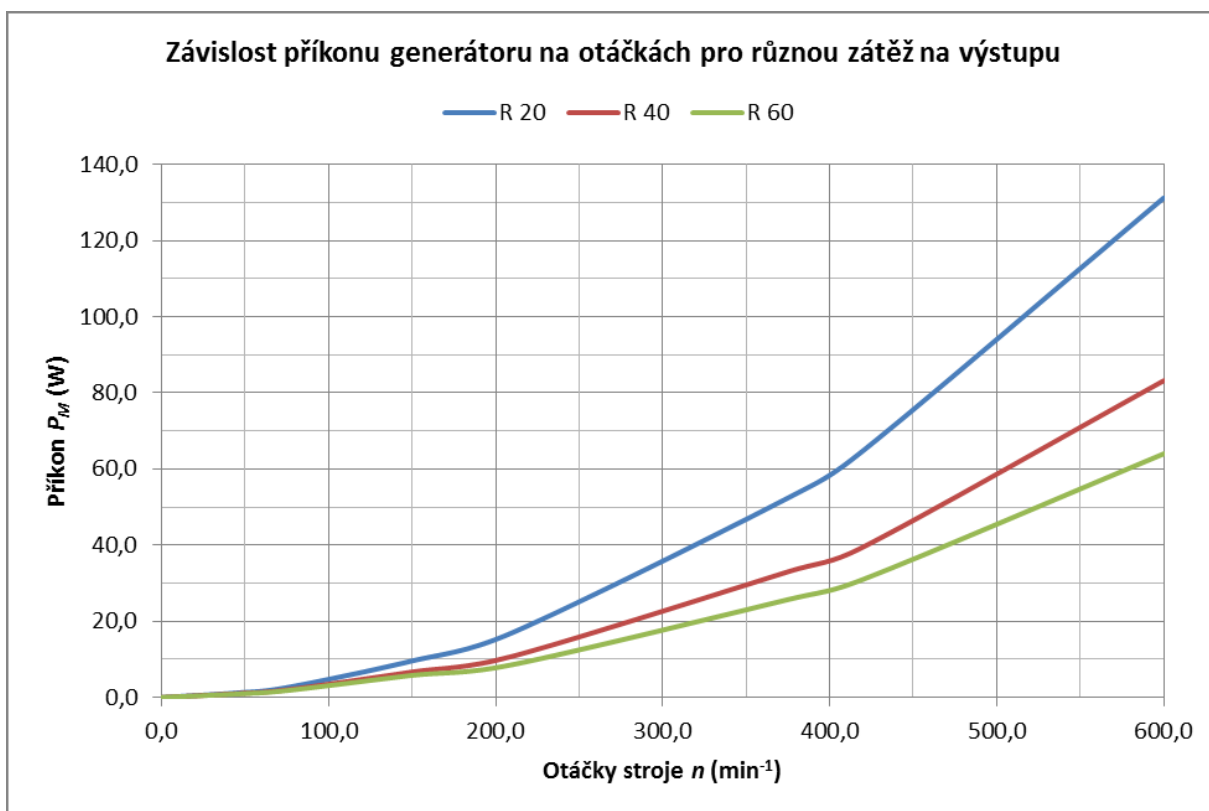
Obr. 33: Axiální stroj s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem. 1 – permanentní magnety, 2 – jádro rotoru, 3 – póly statoru, 4 – vinutí statoru

Generátor byl změřen tak, že při konstantních otáčkách byl zvyšován vstupní proud a měřeno napětí na výstupu. Měřen byl také moment síly a ostatní vstupně-výstupní veličiny. Pro ověření vhodnosti generátoru pro daný typ větrného motoru je nutné znát jeho příkon P_M , impedanci Z_I a při jakých konstantních otáčkách byly tyto veličiny měřeny. Impedance Z_I je poměrem výstupního napětí U_2 k vstupnímu proudu I_I . Mechanický příkon je pak spočítán pomocí vzorce:

$$P_M = M \cdot \omega = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{W}) \quad (16)$$

Do jednoho grafu jsou vyneseny obě tyto veličiny v závislosti na vstupním proudu. Impedance mají tvar mocninné funkce, zato příkon má tvar funkce v závislosti na vstupním proudu přibližně lineární (z důvodu lepší přehlednosti je graf uveden v příloze). Jelikož generátor bude pracovat s pevně danou zátěží na výstupu, je třeba zvolit v rozsahu impedance tři hodnoty zátěže (já jsem zvolil 20, 40 a 60 Ω)

a pro každou z těchto zátěží z grafu odečíst příslušný příkon pro všechny měřené otáčky. Tím se získají charakteristiky závislosti příkonu na otáčkách stroje pro tři různé zátěže na výstupu.



Obr. 34: Závislost příkonu na otáčkách

Z teorie elektrických strojů je známo, že při nižší zátěži se na výstupu projeví větší výkon. To lze vidět i na grafu z obrázku 34. Při nižší zátěži je zapotřebí větší příkon generátoru a také že s lineárně zvyšujícími se otáčkami příkon nelineárně narůstá. Oba tyto fakty odpovídají teoretickým předpokladům.

3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

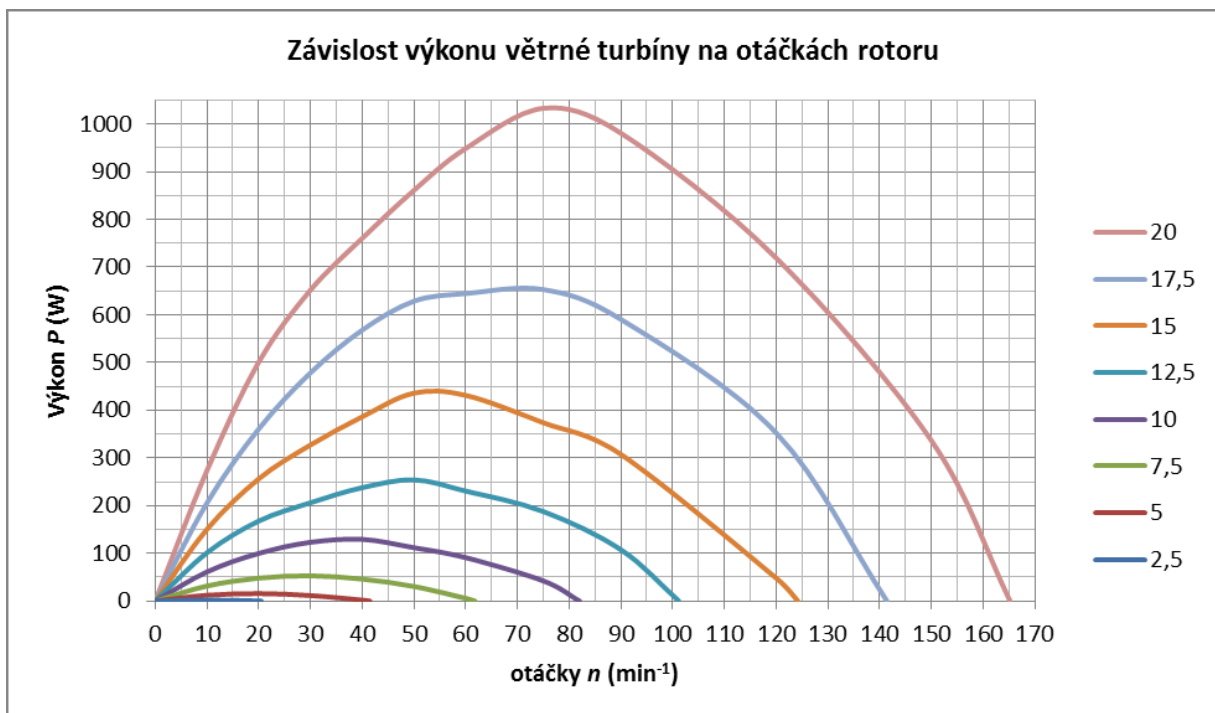
Další část práce je porovnání výsledných charakteristik turbíny s charakteristikami generátoru. Abychom mohli tyto dvě charakteristiky porovnávat, je třeba je přepočítat na stejné veličiny, a to tak že krouťivý moment větrné turbíny M přepočítám na výkon P pomocí známého vzorce (16).

Po přepočtu dostaneme tuto tabulku výkonů:

| Rychlost větru v (m.s^{-1}) | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Otáčky n (min^{-1}) | Výkon turbíny P (W) | | | | | | | |
| 0,0001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 2 | 12,1 | 31,4 | 61 | 101,1 | 150,3 | 205,4 | 273,5 |
| 20 | 0,2 | 15,6 | 48 | 99,8 | 167,6 | 256,0 | 360,6 | 500,5 |
| 30 | -3,4 | 11,5 | 52,9 | 123,2 | 206 | 327,1 | 478,3 | 651,9 |
| 40 | - | 2 | 46 | 129,2 | 237,8 | 386,3 | 568 | 760,6 |
| 50 | - | -12,8 | 30,5 | 111,7 | 254 | 435,9 | 628,7 | 861,1 |
| 60 | - | - | 5,6 | 91 | 230,5 | 431,1 | 644,5 | 948,8 |
| 75 | - | - | -43,4 | 42,2 | 187,6 | 373,7 | 653 | 1033 |
| 90 | - | - | - | -55 | 107,6 | 307,4 | 590,5 | 980,9 |
| 120 | - | - | - | - | -193 | 48 | 352,5 | 719,3 |
| 150 | - | - | - | - | - | -349,7 | -152,7 | 336,1 |
| 180 | - | - | - | - | - | - | - | -366,2 |

Tab. 3: Tabulka výkonů větrného motoru

Na obrázku 35 je znázorněn průběh mechanického výkonu na otáčkách rotoru. Z grafu lze pro každou rychlost větru vyčíst, při jakých otáčkách bude výkon turbíny maximální. Z grafu také vyplývá, že s vyšší rychlostí větru se zvyšují i otáčky, při kterých turbína dosahuje maximálního výkonu.

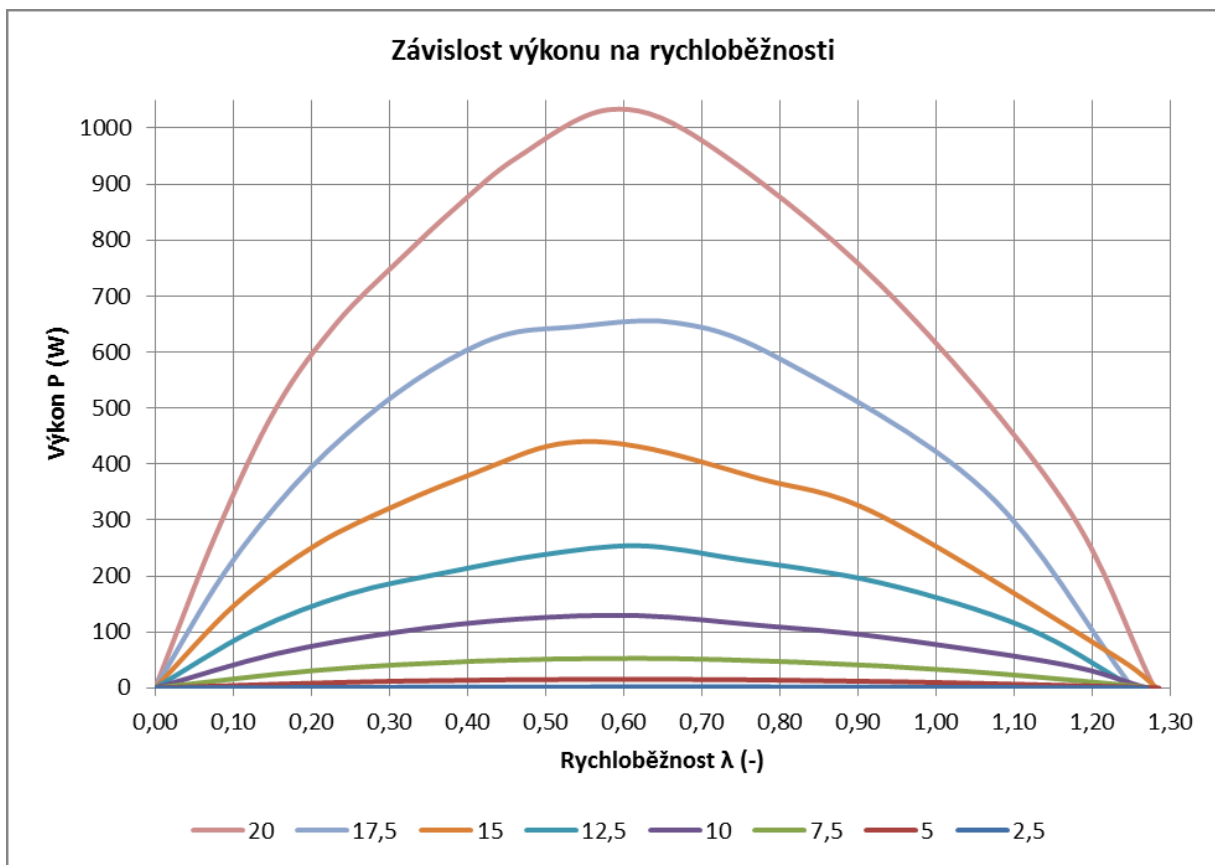


Obr. 35: Závislost výkonu na otáčkách rotoru.

Přepočtem otáček na rychloběžnost lze zobrazit závislost dodávaného výkonu na rychloběžnosti větrné turbíny λ (-). Přepočet lze jednoduše provést pomocí vzorce (15).

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\varpi \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{60 \cdot v},$$

kde n představuje otáčky rotoru, R představuje rameno, tedy vzdálenost od osy otáčení (poloměr) a v je rychlost proudění větru. Po přepočítání vznikne závislost výkonu turbíny na její rychloběžnosti (obrázek 36), ze které lze vyčíst, že maximální výkon bude turbína dodávat přibližně při rychloběžnosti 0,6. To je potvrzení faktu, že se jedná o pomaluběžnou turbínu a také to potvrzuje teoretický předpoklad, podle kterého klasická koncepce Lafondovy turbíny dodává největší výkon při rychloběžnosti 0,5. Tento rozdíl jedné desetiny znamená, že úpravy na řešeném typu Lafondovy turbíny zvýšili její rychlost otáčení.



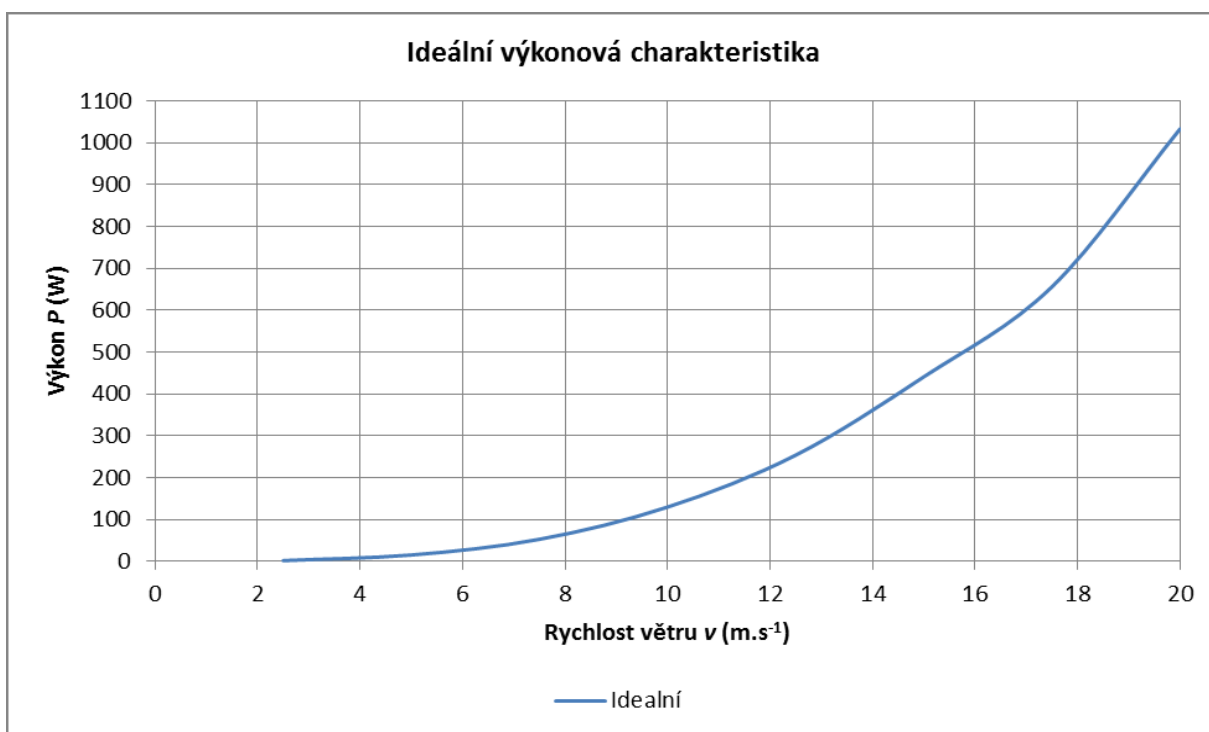
Obr. 36: Závislost výkonu na rychloběžnosti rotoru.

Pokud se pospojují maximální hodnoty výkonů každé rychlosti větru, vznikne ideální výkonová charakteristika dané větrné turbíny (obrázek 37). Můžeme vidět, že křivka má exponenciální tvar, což odpovídá teoretickému předpokladu, že se vzrůstající rychlostí větru narůstá výkon s třetí mocninou. Tedy výkon při $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ by měl být přibližně 8x větší než výkon při rychlosti větru $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z tabulky 4 si lze spočítat že:

$$\frac{P_{20}}{P_{10}} = \frac{1033}{130} = \underline{\underline{7,95}} \quad (17)$$

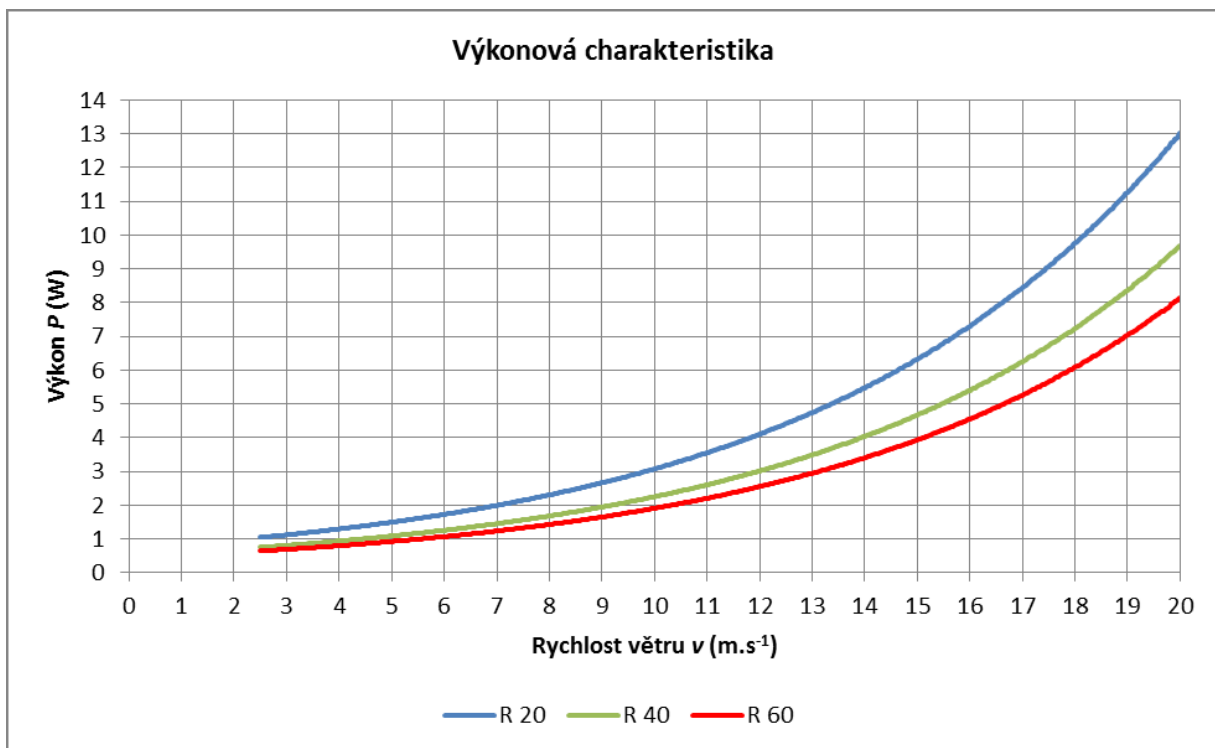
| | Ideální | Zátěž $R = 20 \Omega$ | Zátěž $R = 40 \Omega$ | Zátěž $R = 60 \Omega$ |
|--|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Rychlost větru v (m.s^{-1}) | Výkon P (W) | | | |
| 2,5 | 1,98 | 0,8 | 0,6 | 0,5 |
| 5 | 15,6 | 1,5 | 1 | 1 |
| 7,5 | 53 | 2,3 | 1,6 | 1,2 |
| 10 | 130 | 4 | 3 | 2,3 |
| 12,5 | 254 | 5 | 4 | 3,5 |
| 15 | 441 | 7 | 5,5 | 4,7 |
| 17,5 | 656 | 8 | 6 | 5,5 |
| 20 | 1033 | 11 | 7,5 | 6 |

Tab. 4: Tabulka výkonových charakteristik



Obr. 37: Ideální výkonová charakteristika

Skutečnost ale nikdy není ideální, a skutečná výkonová charakteristika bude záviset v první řadě na vlastnostech generátoru, který by měl mechanický výkon turbíny převádět na elektrickou energii. Z toho důvodu se v předchozí kapitole sestavoval graf závislosti příkonu generátoru na otáčkách pro danou zátěž (obrázek 34). Proložení charakteristik těchto dvou grafů vzniknou průsečíky výkonů s rychlostmi větru, které poslouží k sestavení konečných výkonových charakteristik.



Obr. 38: Výkonové charakteristiky větrného motoru s generátorem pro určitou zátěž

Na obrázku 38 je znázorněna výkonová charakteristika větrné turbíny s použitým synchronním generátorem s permanentními magnety. Na první pohled je patrné, že křivky mají podobný exponenciální tvar. Bohužel pracovní oblasti výkonů generátoru se pohybují úplně jinde než ideální získatelný výkon větrné turbíny, a jsou mnohem nižší. To svědčí o faktu, že použitý generátor se k větrnému motoru vůbec nehodí, a využil by jen zlomek možné získatelné energie.

4 ZÁVĚR

Tato diplomová práce má za cíl ukázat možnosti využití CFD (Computational Fluid Dynamics) simulací při návrhu větrných elektráren. Zaměřena je především na možnost optimalizace a zvyšování efektivity větrné turbíny již při samotném návrhu pomocí moderního softwaru a otestování vlastností dané turbíny, aniž by musela být nejprve fyzicky vyrobena.

Model byl vytvořen pomocí 3D CAD (Computer Aided Design) softwaru SolidWorks. Konkrétně šlo o vylepšený typ Lafondovy turbíny, obohacený o soustavu rozváděcích desek rovnoměrně rozmístěných při vnějším obvodu rotoru. Tyto rozváděcí desky měli za úkol optimalizovat proudění větru do prostoru rotoru větrné turbíny, což se potvrdilo. Stejná simulace byla provedena na modelu bez rozváděcích desek a na upraveném modelu byl vyvolaný moment síly i výkon vyšší až o desítky procent (v průměru cca 30%, pro nižší otáčky více).

Konečný návrh modelu byl poté importován do simulačního softwaru ANSYS Workbench, kde jsem k řešení použil nástroj Fluid Flow (CFX) využívající pro řešení metodu konečných prvků. Z důvodů zkrácení časové náročnosti výpočtu byl použit 1 mm silný řez modelu. Řešení tohoto řezu je aplikovatelné na plnou délku turbíny. Na řezu byla vytvořena výpočetní síť o více než stotisíci elementů, které jsou tvořeny malými jehlany. Následovalo nadefinování jednotlivých prvků simulace a také parametrů proudění větru. Závěrečným krokem bylo samotné řešení úlohy se zadanými vstupními parametry.

Celkově bylo provedeno 71 simulací. Simulace byly prováděny pro 8 různých rovnoměrně rozložených rychlostí větru. Pro každou rychlost větru byly do programu vzestupně zadávány takzvané brzdné otáčky, pro které program dopočítal kroutivý moment síly. Tento moment by měl s rostoucími otáčkami klesat. Jakmile moment klesl do záporných hodnot, nemělo smysl pokračovat s výpočtem pro vyšší otáčky, jelikož těch by turbína nikdy nedosáhla. Výsledkem těchto simulací byla momentová charakteristika turbíny, což je závislost kroutivého momentu na otáčkách rotoru. Tyto charakteristiky potvrdily klesající tendenci kroutivého momentu s rostoucími otáčkami. Z charakteristik bylo také zjištěno, že pracovní otáčky rotoru by měly být přibližně 80 otáček za minutu. Těchto otáček rotor dosáhne při rychlosti větru 10 m.s^{-1} . Rychloběžnost motoru λ vyšla 0,6, což přibližně odpovídá teoretickým předpokladům.

Pro získání výkonové charakteristiky bylo nutné sjednotit vypočtené hodnoty z provedených analýz větrného motoru a výsledky z laboratorních měření zatěžovacích charakteristik generátoru. To jsem provedl přepočítáním momentových charakteristik větrné turbíny na výkonové charakteristiky závislé

na otáčkách rotoru. Proložením výkonových charakteristik závislých na otáčkách větrného motoru a generátoru jsem získal průsečíky výkonu pro simulované rychlosti větru.

Výsledné výkonové charakteristiky bohužel nevyšly dobře. Je zřejmé, že použitý synchronní generátor není pro navržený větrný motor vhodný. Navržená větrná turbína pracuje s nižšími otáčkami než synchronní generátor, a byla by schopna dodávat větší výkon než ten, pro který byl generátor zkonstruován.

Další vývoj projektu se může ubírat dvěma směry. Jedna možnost je ve vhodnější konstrukci synchronního generátoru s permanentními magnety. Například otáčky generátoru se odvíjí od počtu pólových dvojic permanentních magnetů umístěných na rotoru generátoru. Zvýšení počtu permanentních magnetů by mělo za následek snížení pracovních otáček generátoru. Konstrukce generátoru je však předmětem jiné diplomové práce.

Další možností je optimalizace návrhu větrné turbíny. Například menším počtem lopatek, případně jejich zmenšením, by se dosáhlo vyšší rychloběžnosti větrného motoru a vyšších pracovních otáček. Místo rozváděcích desek při vnějším obvodu rotoru by bylo možné použít kryt, který by zakrýval tu polovinu rotoru, která se pohybuje proti směru proudění větru. V takovém případě by samozřejmě musela být osa otáčení rotoru horizontální a větrný motor by musel být doplněn o zařízení natáčející rotor kolmo ke směru proudění větru. Existuje mnoho variant návrhu a díky nejmodernějším konstrukčním a simulačním programům bude vývoj větrných elektráren a využívání energie větru dále na vzestupu.

Seznam použité literatury a publikací

- [1] RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7
- [2] Větrné elektrárny - mikro, malé i velké - princip, provedení, regulace. *automatizace.hw.cz* [online]. 26.10.2006 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006102901>
- [3] Větrná mapa. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR* [online]. 2009 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/>
- [4] *Alternative Renewable Energy Sources* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.aresico.com/cz/m/vetrne-elektrarny/>
- [5] Počet listů rotoru větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310>
- [6] *Větrné elektrárny* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://xxxak.sweb.cz/ano3.html>
- [7] Využití energie větru. *Eamos* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: http://www.eamos.cz/amos/kat_fyz/modules/low/kurz_text.php?id_kap=18&kod_kurzu=kat_fyz_7356
- [8] Větrná elektrárna ø2.5m. *EcoShop* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://www.ecoshop.cz/vyrobek/436/0_vitr/
- [9] VLÁČILOVÁ, Hana, Milena VILÍMKOVÁ a Lukáš HENCL. *SolidWorks*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, 319 s. ISBN 80-251-1314-0
- [10] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Návody do cvičení "Modelování proudění" - CFX*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-248-2050-7
- [11] GIERAS, Jacek F, Rong-Jie WANG a Maarten J KAMPER. *Axial flux permanent magnet brushless machines*. Boston: Kluwer, 2004, 340 s. ISBN 14-020-2720-6

Seznam příloh

Příloha č. 1: Vizualizace tlaku a rychlosti proudění větru v prostoru rotoru turbíny

Příloha č. 2: Graf synchronního generátoru s permanentními magnety